



Titre: Caractérisation électrique et thermique de matériaux en composite de carbone utilisés en aéronautique dans le cadre d'études de solutions de retour de courant
Title:

Auteur: David Lalonde
Author:

Date: 2011

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Lalonde, D. (2011). Caractérisation électrique et thermique de matériaux en composite de carbone utilisés en aéronautique dans le cadre d'études de solutions de retour de courant [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/763/>
Citation:

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/763/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Frédéric Sirois
Advisors:

Programme: Génie Électrique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CARACTÉRISATION ÉLECTRIQUE ET THERMIQUE DE MATÉRIAUX EN
COMPOSITE DE CARBONE UTILISÉS EN AÉRONAUTIQUE DANS LE CADRE
D'ÉTUDES DE SOLUTIONS DE RETOUR DE COURANT

DAVID LALONDE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)
DÉCEMBRE 2011

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

CARACTÉRISATION ÉLECTRIQUE ET THERMIQUE DE MATÉRIAUX EN
COMPOSITE DE CARBONE UTILISÉS EN AÉRONAUTIQUE DANS LE CADRE
D'ÉTUDES DE SOLUTIONS DE RETOUR DE COURANT

présenté par : LALONDE, David

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès Sciences Appliquées

a été dûment accepté par le jury constitué de :

M. GUARDO Robert, Ph.D., président.

M. SIROIS Frédéric, Ph.D., membre et directeur de recherche.

M. MOUPFOUMA Fidèle, Ph.D., membre.

*À Djourha, ma compagne
pour m'avoir soutenu lors de ces travaux.*

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, Frédéric Sirois, professeur au département de génie électrique de l'École Polytechnique de Montréal et responsable du laboratoire d'énergie, pour son support, sa collaboration et ses conseils tout au long de ce projet de maîtrise. Je tiens également à remercier Fidèle Moupfouma, ingénieur spécialiste en compatibilité électromagnétique chez Bombardier Aéronautique, pour m'avoir accueilli et donné l'opportunité de réaliser un projet d'importance industrielle.

Je remercie aussi les employés de Bombardier Aéronautique, dont l'ingénieure Mona Cherkaoui pour son appui technique et documentaire.

Je remercie toute l'équipe du laboratoire d'énergie et particulièrement Jonathan Coulombe pour son assistance technique et Simon Brault pour son support moral lors de certaines séances de mesures expérimentales.

Finalement, je remercie les organismes subventionnaires qui m'ont offert des bourses d'étude, soit une Bourse en Milieu Pratique du FQRNT ainsi qu'une bourse MITACS.

RÉSUMÉ

En aéronautique, les matériaux composites sont de plus en plus considérés en remplacement des alliages d'aluminium pour le fuselage des avions. Cette tendance semble principalement justifiée par une liste d'avantages de nature principalement mécanique, par exemple la réduction du poids structurel et les avantages qui en découlent. Comme le fuselage des avions sert actuellement pour le retour de courant continu, le présent projet s'intéresse aux propriétés électriques et thermiques de ces matériaux composites dans le cadre de la recherche de solutions de retour de courant pour les avions en matériaux composites.

Par des mesures de résistivité électrique du composite en fonction de la température ambiante, il est montré que cette dernière n'a qu'un faible impact sur la résistivité du composite. Avec les résultats obtenus, on confirme l'hypothèse selon laquelle le composite de carbone utilisé pendant les essais est trop résistif pour servir, tel quel, de médium primaire de retour de courant pour les avions.

L'investigation des profils équipotentiels en surface et en-dessous d'un échantillon de composite permet de mieux comprendre le mécanisme de diffusion du courant continu dans le composite. Ces résultats sont également utilisés pour estimer la résistance d'interface entre une électrode métallique d'injection du courant et le composite. Cette résistance de contact dépend, entre autres, de la préparation préalable de la surface du composite et du couple de serrage du boulon de l'électrode.

La réponse thermique du composite suite au passage d'un courant continu dépend à la fois de l'amplitude du courant et de la durée d'application de ce dernier. Un seuil de courant est obtenu expérimentalement pour un échantillon donné dans le but de mieux comprendre les capacités thermiques du composite de carbone. Il est également montré que les contacts constituent la principale source de dissipation d'énergie.

En parallèle, un script MATLAB-COMSOL est partiellement développé pour le calcul des paramètres d'impédance propre et mutuelle. Bien qu'il reste des étapes de développement pour le calcul des capacités, il est présenté pour fin indicative dans l'éventualité de travaux subséquents. L'intérêt principal réside dans l'élaboration d'un algorithme simple pour le calcul des capacités des groupes de câbles dans un environnement MATLAB-COMSOL.

ABSTRACT

Carbon composite materials are often considered for the replacement of aluminium alloys in the design of aircraft fuselage skins. The main advantages regarding this trend come from the primary weight reduction involved with carbon composites and other related mechanical advantages. Currently, aircraft fuselage skins are thoroughly used for the electrical current return network and the actual project focuses on the characterization of some electrical and thermal properties of carbon composites in the context of aircraft current return network studies.

Measurements of electrical resistivity of a given sample are done with respect to the ambient temperature. The results show a negligible dependence between these two parameters. This experimentation also allows confirming the hypothesis that carbon composites can not be used, directly, as primary current return media in the design of electrical current networks.

In order to better understand the electrical current distribution through carbon composites, the project measures the electrical voltage distribution on the surface and within a given composite sample. These results are also used in computing the resistance between the electrical contacts and the composite, which is found to be highly dependent on the torque applied to the electrical contact and the state of the composites surface.

It is found that the thermal response of the composite to electrical current is highly dependent on the current amplitude and its duration. These tests allow evaluating a safety threshold, giving an operational thermal limit for the material. It is shown that the highest level of generated heat comes from the vicinity of the electrical contacts compared to the body of the sample.

As a complement to this work, the computation of lumped parameters for any given multi-conductor configuration is explored by programming a MATLAB-COMSOL script. This project is ongoing, but the code is reported in an Appendix for continuation in a near future. The main interest of this code resides in the description of a simple algorithm to be implemented in a MATLAB-COMSOL environment for computing capacitive lumped parameters.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vi
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES ANNEXES	xiii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xiv
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Définitions et concepts de base	1
1.1.1 Retour du courant électrique sur les avions en aluminium	1
1.1.2 Revêtement du fuselage en composite de carbone	2
1.2 Éléments de la problématique	4
1.2.1 Retour du courant électrique sur les avions en composite de carbone	4
1.2.2 Facteurs agissant sur la résistivité électrique	4
1.2.3 Distribution du courant continu dans le composite de carbone	6
1.2.4 Résistance électrique de contact	6
1.3 Objectifs de recherche	6
1.3.1 Importance de la recherche	8
1.4 Plan du mémoire	8
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	9
2.1 Généralités	9
2.2 Problématique de retour de courant	9
2.3 Résistivité électrique du composite de carbone	10
2.4 Caractérisation thermique du composite de carbone	10

2.5	Aspect électromagnétique	10
2.6	Références industrielles	11
2.7	Autres ressources d'intérêt	11
CHAPITRE 3 RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE		13
3.1	Objectif du chapitre	13
3.2	Méthodologie	13
3.2.1	Mesure de résistivité par la méthode à 4 points	13
3.2.2	Contrôle de la température	14
3.2.3	Préparation des échantillons	14
3.2.4	Procédure	17
3.2.5	Montage	18
3.3	Résultats	19
3.3.1	Résistivité en fonction de la température	19
3.3.2	Résistivité en fonction du courant	23
3.3.3	Estimations	24
CHAPITRE 4 DISTRIBUTION DU COURANT CONTINU		27
4.1	Objectif du chapitre	27
4.2	Méthodologie	27
4.2.1	Mesure matricielle de chutes de tensions	27
4.2.2	Résistance d'interface	28
4.2.3	Préparation de l'échantillon	29
4.2.4	Procédure	30
4.2.5	Montage	30
4.3	Résultats	30
4.3.1	Profils de distribution	30
4.3.2	Propagation de la surface supérieure vers la surface inférieure	35
4.3.3	Résistance de contact	37
4.3.4	Autres observations	38
CHAPITRE 5 EFFET THERMIQUE D'UN COURANT CONTINU		40
5.1	Objectif du chapitre	40
5.2	Méthodologie	40
5.2.1	Mesure thermique infrarouge	40
5.2.2	Échantillon	40
5.2.3	Procédure	40

5.2.4	Montage	41
5.3	Résultats	42
5.3.1	Élévation de température selon le courant et le temps	42
5.3.2	Seuils	43
5.3.3	Puissances	44
5.3.4	Chute de tension en fonction de la température	46
5.3.5	Autres observations	46
CHAPITRE 6	PARAMÈTRES D'IMPÉDANCE PROPRE ET MUTUELLE	48
6.1	Objectif du chapitre	48
6.2	Méthodologie	48
6.2.1	Méthode des éléments finis	48
6.2.2	Utilisation du code Matlab	49
6.2.3	Calcul des paramètres résistifs et inductifs, R et L	49
6.2.4	Calcul des paramètres capacitifs C	51
6.2.5	Solution pour le calcul des paramètres capacitifs C	54
6.2.6	Approche Générique	55
6.2.7	Algorithme	60
6.3	Résultats	61
6.3.1	Paire de 2 conducteurs	61
CHAPITRE 7	CONCLUSION	64
7.1	Synthèse des travaux	64
7.2	Projets futurs	65
RÉFÉRENCES	68
ANNEXES	73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Spécificités quant à l'utilisation du composite de carbone en aéronautique	3
Tableau 1.2	Objectif du projet de recherche	6
Tableau 1.3	Étapes du projet de recherche	7
Tableau 3.1	Algorithme de l'essai de résistivité	17
Tableau 3.2	Résistivité électrique des échantillons testés de composite de carbone et de matériaux métalliques utilisés en aéronautique	22
Tableau 3.3	Résistance et chutes de tension	26
Tableau 4.1	Algorithme des essais relatifs à la diffusion du courant dans le composite	30
Tableau 4.2	Chutes de tension sur la face supérieure du composite (V)	32
Tableau 4.3	Chutes de tension sur la face inférieure du composite (V)	32
Tableau 4.4	Intersections des courbes de chute de tension pour les faces supérieures et inférieures	36
Tableau 4.5	Mesures de tension effectuées pour différents couples de serrage . . .	38
Tableau 5.1	Algorithme de l'essai électrothermique	41
Tableau 5.2	Température du composite selon le courant et le temps (°C)	44
Tableau 5.3	Calcul des puissances pour chaque essai électrothermique	45
Tableau 6.1	Association du nombre de conducteurs aux nombres de capacités C inconnues	55
Tableau 6.2	Combinaisons de tension possibles pour 5 conducteurs	56
Tableau 6.3	Combinaisons de 2 tensions possibles pour n conducteurs	56
Tableau 6.4	Algorithme de calcul des capacités C	61
Tableau C.1	Mesures obtenues avec le nanovoltmètre Keithley 2182A sous excitation impulsionnelle	77

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Principe de retour du courant par le fuselage	2
Figure 1.2	Température de l'atmosphère standard, de 0 à 36000 pieds d'altitude	5
Figure 3.1	Mesure de la résistivité par la méthode à 4 points	14
Figure 3.2	Échantillons 1 et 2 découpés à un angle relatif de 90 degrés	15
Figure 3.3	Support à échantillon avec composite de carbone complet	16
Figure 3.4	Sondes de tension appliquées par pression	16
Figure 3.5	Position des sondes de tension et de température sur l'échantillon . .	17
Figure 3.6	Schéma du montage expérimental	18
Figure 3.7	Détails internes de l'enceinte Keihtley 7001	19
Figure 3.8	Chambre climatique Thermotron	20
Figure 3.9	Détails du circuit	21
Figure 3.10	Résistivité électrique, échantillon 1, canal 2	22
Figure 3.11	Résistivité électrique, échantillon 2, canal 2	23
Figure 3.12	Cabine des passagers simplifiée du Global 5000	24
Figure 4.1	Courbes équipotentielles sur le composite	27
Figure 4.2	Manifestation de la résistance de contact	28
Figure 4.3	Schéma de coupe de l'échantillon pour les essais relatifs à la diffusion du courant dans le composite	29
Figure 4.4	Échantillon de composite pour les essais relatifs à la diffusion du cou- rant dans le composite	29
Figure 4.5	Montage expérimental pour les essais relatifs à la diffusion du courant dans le composite	31
Figure 4.6	Chutes de tension sur la face supérieure	33
Figure 4.7	Chutes de tension sur la face inférieure	33
Figure 4.8	Rondelle décentrée	34
Figure 4.9	Superposition de l'orientation des fibres au profil équipotentiel	35
Figure 4.10	Chutes de tension suivant l'axe longitudinal 2,5 mm	36
Figure 4.11	Chutes de tension suivant l'axe 0 mm	37
Figure 5.1	Montage expérimental pour les essais électrothermiques	41
Figure 5.2	Élévation de température du composite 0-90 minutes	42
Figure 5.3	Élévation de température du composite 0-5 minutes	43
Figure 6.1	Paramètres R et L d'une configuration à n conducteurs	50
Figure 6.2	Paramètres C d'une configuration à n conducteurs	52

Figure 6.3	Figure pour 2 conducteurs parallèles	62
Figure 6.4	Résultats pour 2 conducteurs parallèles à 400Hz	63
Figure A.1	Deux fibres de carbone observées au microscope à balayage	73
Figure B.1	Coupe de profil d'un échantillon de composite de carbone	74
Figure B.2	Détails techniques des échantillons de composite de carbone	75
Figure C.1	Interface et diagramme LabVIEW de Pulse_Multimeter_GPIB.vi	76
Figure D.1	Interface LabVIEW de Multipoint_Pulse_Final.vi	79

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Mesures de résistivité électrique d'une fibre de carbone individuelle .	73
Annexe B	Détails techniques des échantillons de composite de carbone	74
Annexe C	Durée d'impulsion optimale pour essais de résistivité	76
Annexe D	Interface LabVIEW pour les mesures de résistivité	79
Annexe E	Code Impédances MATLAB-COMSOL	80
Annexe F	Code MATLAB-COMSOL pour calcul alternatif de C	92

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AC	Alternative Current
AIAA	American Institute of Aeronautics and Astronautics
DC	Direct Current
GLARE	Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy
MEA	More Electrical Aircraft
TRU	Transformer Rectifier Unit

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

En aéronautique, de nouveaux matériaux sont développés afin de répondre à une liste d'objectifs opérationnels et économiques de plus en plus exigeants. Le revêtement des fuselages en alliage d'aluminium tend à être graduellement remplacé par des matériaux tel que les composites de carbone, les matériaux GLARE [1, 2] ou d'autres alliages complexes. D'un point de vue électrique, la conductivité élevée d'un revêtement d'aluminium permet, entre autre, le retour du courant électrique des équipements embarqués, la circulation des courants de foudre ainsi qu'un certain degré de protection de l'équipement interne de l'avion contre les sources externes de bruit électromagnétique en agissant comme une grande cage de Faraday [3]. Cependant, pour les composites de carbone, leur résistivité électrique plus élevée nécessite l'étude de nouveaux concepts.

1.1 Définitions et concepts de base

1.1.1 Retour du courant électrique sur les avions en aluminium

Sur un aéronef, les équipements électriques sont répartis sur toute la longueur de l'appareil à différents endroits physiques que l'on appelle des *stations*. Cependant, il est courant de retrouver les sources de puissance réunies autour d'une zone spécifique. On note par exemple que les génératrices AC ou DC se trouvent dans la zone des moteurs et que leur tension de sortie est ramenée en un point de distribution. Il y a aussi les redresseurs (TRUs) qui fournissent une tension continue redressée à partir de la tension alternative primaire et qui se trouvent souvent installés dans le nez de l'avion.

Pour alimenter un équipement électrique à courant continu, typiquement de $28 V_{DC}$, situé à un endroit donné, on utilise évidemment un conducteur d'alimentation. Mais pour compléter le circuit électrique et ainsi assurer le retour de courant de la charge à la source, on utilise actuellement le revêtement du fuselage en aluminium ainsi que les pièces structurales, qui sont elles aussi en aluminium tel que montré à la figure 1.1. De cette façon, on réduit considérablement le poids qui résulterait, autrement, de la présence du câblage de retour [4].

De plus, on observe d'après l'équation 1.1 [3] que la profondeur de peau d'un revêtement d'aluminium est relativement plus faible dû à sa grande conductivité, soit d'environ 6 mm à une fréquence de 400 Hz en utilisant les données du tableau 3.2. Ceci permet une certaine ségrégation des courants électriques.

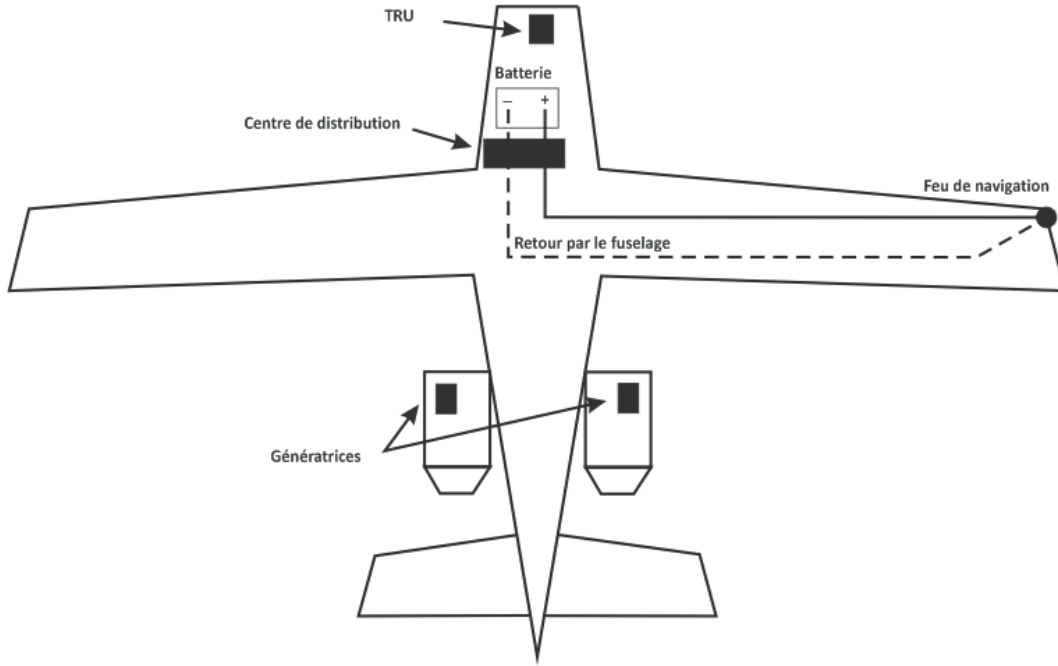


Figure 1.1 Principe de retour du courant par le fuselage

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad [\text{m}] \quad (1.1)$$

Où δ , ω , μ et σ sont respectivement la profondeur de peau (m), la fréquence ($\frac{\text{rad}}{\text{s}}$), la perméabilité ($\frac{\text{H}}{\text{m}}$) et la conductivité ($\frac{\text{S}}{\text{m}}$).

Comme les courants à haute fréquence atteignent une plus petite profondeur dans le revêtement que les courants de basse fréquence, le bruit électromagnétique externe et les courants de foudre demeurent près de la surface extérieure du revêtement tandis que l'intérieur peut être utilisé pour le retour du courant continu. Le revêtement en alliage d'aluminium remplit donc, en même temps, plusieurs tâches essentielles d'un point de vue électrique.

1.1.2 Revêtement du fuselage en composite de carbone

Certains matériaux composites ont déjà été utilisés dans le domaine militaire, mais les normes de certification et pratiques civiles plus exigeantes ralentissent l'avènement de ces matériaux dans le domaine commercial. Pourtant, la compétition féroce entre les constructeurs aéronautiques impose la recherche constante de spécifications opérationnelles plus avantageuses dans le cadre des projets actuels et futurs. Après l'utilisation massive des alliages d'aluminium pour le revêtement des avions, l'industrie aéronautique se tourne donc actuel-

lement vers des matériaux plus complexes, soit entre autre les composites de carbone.

Pour l'instant, les avantages mis de l'avant pour le passage au revêtement en composite de carbone sont typiquement de nature mécanique ou physique. On avance, par exemple, l'hypothèse d'une importante réduction du poids structurel et de cet avantage, on en déduit une suite logique d'autres avantages tel qu'une économie en carburant, une augmentation de la distance franchissable et bien d'autres encore [5, 6, 7]. Le tableau 1.1 [8] présente quelques spécificités quant à l'utilisation du composite de carbone en aéronautique par rapport aux alliages d'aluminium.

Tableau 1.1 Spécificités quant à l'utilisation du composite de carbone en aéronautique

- Réduction du poids structurel
– Réduction du poids de 15-20%
– Coût de la réduction du poids de \$60-\$100 par kg
– Réduction du nombre de joints structurels
- Performances
– Amélioration de l'aérodynamisme
– Plus résistant à l'environnement acoustique
– Meilleure contention d'incendies
– Meilleure résistance en cas d'écrasement
- Coûts d'acquisition
– Augmentation du coût matériel
– Réduction due à la réduction de joints
– Augmentation du coût de fabrication
- Coûts de réparation
– Réduction en rapport avec une bonne résistance à la fatigue
– Réduction en rapport à l'immunité à la corrosion
– Augmentation en rapport avec une grande sensibilité aux impacts
– Augmentation en rapport avec la vulnérabilité à la délamination

Or, la majorité des avantages ne peut être rencontrée qu'en considération de tous les autres aspects et rôles du fuselage, dont ceux du domaine électrique. Par exemple, à la lumière des observations précédentes, il est réaliste d'estimer que l'utilisation de tels matériaux pourrait nécessiter l'ajout d'équipement supplémentaire, tel que des câbles de retour, et l'avantage de réduction de poids pourrait en être affecté. Il est donc primordial de revoir certaines techniques de conception relativement aux systèmes électriques, mais aussi de réaliser des études approfondies relativement aux propriétés électriques et thermiques du composite de carbone [9]. À ce sujet, plusieurs questions nécessitent une réponse, telles que celles énumérées ci-après.

1. Quelle est la résistance électrique des composites de carbone envisagés en industrie ? Est-elle trop élevée ?
2. À quoi ressemble la distribution du courant dans le composite de carbone ?
3. Quel courant peut être conduit avant que ne surviennent des dommages dus à l'échauffement ?
4. Quelle est la résistance de contact entre le composite de carbone et un connecteur métallique ?

1.2 Éléments de la problématique

1.2.1 Retour du courant électrique sur les avions en composite de carbone

L'utilisation de matériaux composites pour le fuselage d'un avion implique, a priori, l'absence d'un plan de masse électrique et métallique, tel que pour les avions en aluminium. Bien que le carbone soit parfois considéré comme un médium conducteur potentiel dans certaines applications, l'hypothèse qu'il est un mauvais conducteur électrique pour le revêtement d'un avion est répandue.

Pour le réseau de retour de courant d'un avion, un médium trop résistif implique plusieurs problèmes potentiels. Tout d'abord, pour un même courant, il y a une plus grande augmentation de température du matériau. Pour un composite de carbone, la température est d'autant plus critique puisqu'il est composé de résine qui fond à des températures relativement basses. Cette limite d'échauffement due à l'effet Joule est importante puisque la limite opérationnelle du composite de carbone considérée par le partenaire industriel est de 85 °C. Dans la littérature, on parle également de 80 °C pour plusieurs composites de carbone [8].

Vu comme plan de masse du système de génération et de distribution électrique d'un avion, le réseau de retour de courant est un plan équipotentiel. Ainsi, le réseau agit comme point de référence potentiel pour tous les équipements électriques. Un médium de retour de courant trop résistif implique des chutes de tension non négligeables dans ce réseau et des différences de potentiel d'un point à l'autre du plan de masse. Cette situation est à éviter à la fois pour le bon fonctionnement des équipements ainsi que pour éviter la formation d'arcs électriques entre des points à différents potentiels.

1.2.2 Facteurs agissant sur la résistivité électrique

Température atmosphérique

La température a un impact sur la résistivité d'un matériau donné [10], et la température atmosphérique est un paramètre qui varie selon l'altitude. Le modèle standard de l'atmosphère 1976 [11] permet de tracer la relation de la figure 1.2.

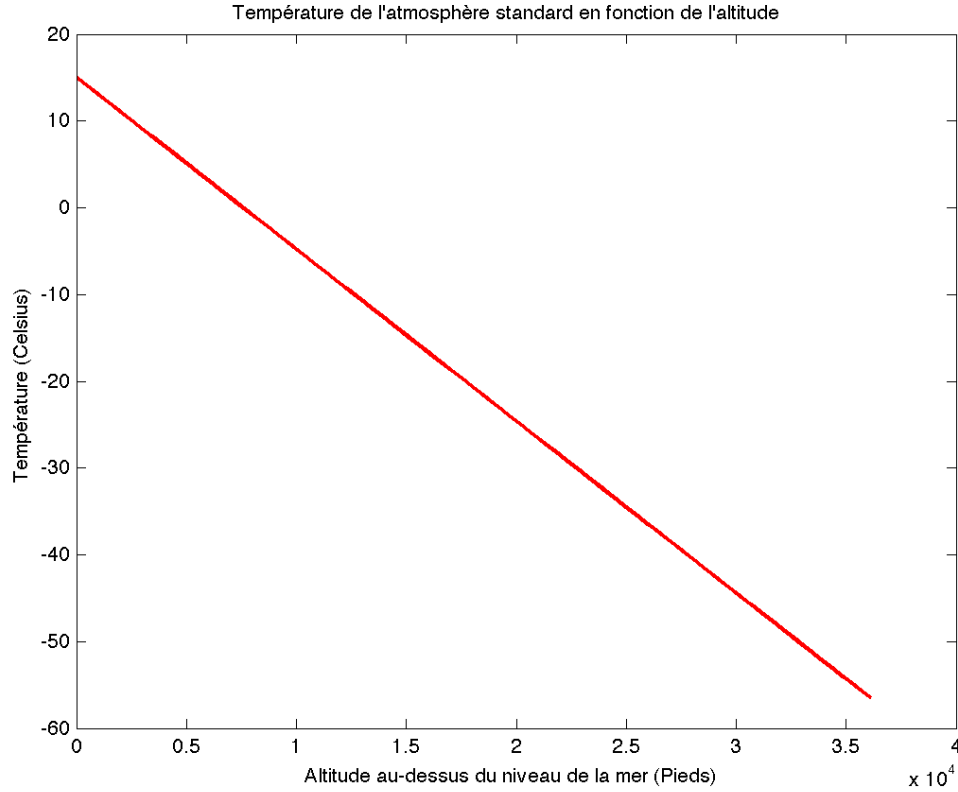


Figure 1.2 Température de l'atmosphère standard, de 0 à 36000 pieds d'altitude

Dans le domaine aéronautique, il devient donc tout à fait légitime de s'intéresser à la résistivité électrique en relation avec la température. On note que le coefficient α de variation de la résistivité du carbone pur en fonction de la température α est de l'ordre de $-0,0005 \text{ K}^{-1}$ [12] en relation avec l'équation 1.2.

$$\Delta\rho = \alpha\Delta T\rho_0 \quad [\Omega\text{m}] \quad (1.2)$$

Où $\Delta\rho$, α , ΔT et ρ_0 sont respectivement la variation de résistivité (Ωm), le coefficient de variation de résistivité (K^{-1}), la variation de température (K) et la résistivité à température standard (Ωm).

Orientation des fibres

Les matériaux composites sont constitués de couches de fibres qui sont orientées selon différentes directions d'une matrice, ici polymérique. L'orientation des fibres est choisie pour répondre à des contraintes mécaniques, mais elle a aussi un impact sur la résistivité du

composite comme l'ont montré certains travaux [13]. Cet aspect est pris en considération dans le projet actuel.

Forces mécaniques

On note que les forces mécaniques appliquées sur les matériaux composites ont aussi un impact sur la résistivité. Par exemple, des essais ont déjà été réalisés en traction [14] sur des échantillons de composite de carbone.

1.2.3 Distribution du courant continu dans le composite de carbone

La question de la distribution du courant continu dans le composite de carbone mérite d'être investiguée. Elle demeure une inconnue dans le sens où on arrive difficilement à comprendre, par exemple, si le courant passe bel et bien dans chaque couche superposée alors qu'il n'est appliqué qu'en surface. Ceci pose un problème lors de la recherche de solutions optimales de connexions électriques à une surface de matériau composite.

1.2.4 Résistance électrique de contact

Il est connu que la connexion électrique entre deux contacts présente une certaine résistance électrique, et que la force agissant sur les contacts a un impact sur cette résistance électrique [15]. Le cas d'une connexion électrique entre une électrode métallique et un composite répond-il aux mêmes règles ? Cette interrogation est un autre obstacle à l'élaboration et l'optimisation de solutions de retour de courant pour les avions en composite de carbone.

1.3 Objectifs de recherche

L'objectif de ce projet de recherche est mis en évidence dans le tableau 1.2. Cet objectif est divisé en étapes présentées dans le tableau 1.3. Ces étapes font chacune l'objet d'un chapitre de ce mémoire.

Tableau 1.2 Objectif du projet de recherche

Caractériser

certaines propriétés électriques et thermiques des composites de fibres de carbone

Dans le cadre de

l'étude de solutions de retour de courant pour les avions au revêtement en composite de fibres de carbone

Tableau 1.3 Étapes du projet de recherche

1. Vérifier l'hypothèse

Le composite de fibres de carbone est trop résistif pour servir, tel quel, de médium primaire de retour de courant.

Mesures visées

Résistivité électrique du composite en fonction de la température

Autre phénomène à considérer

Anisotropie (Orientation des fibres)

2. Investiguer

La distribution équipotentielle en surface du composite et dans les couches superposées.

Mesures visées

Mesure matricielle des chutes de tension en surface et en-dessous d'un échantillon de composite.

Autres observations

Résistance de contact entre un connecteur métallique (cosse) et le composite.

3. Investiguer

Le comportement électrothermique du composite soumis à un courant continu maintenu pendant un certain temps.

Mesures visées

Élévation de température du composite soumis à un courant continu pendant un certain temps.

Autres observations

Puissance dissipée

4. Développer

Un programme MATLAB-COMSOL permettant le calcul de paramètres d'impédance pour des géométries multiconducteurs. Cet objectif a été mis de côté à mi-terme du projet de maîtrise afin de s'attarder aux objectifs précédents. Le travail effectué fait tout de même l'objet d'un chapitre.

1.3.1 Importance de la recherche

Ce projet de recherche entre dans le cadre d’une importante initiative du partenaire industriel en ce qui concerne le développement de solutions de retour de courant pour les avions en matériaux composites. Une meilleure compréhension des propriétés électriques et thermiques des matériaux composites, sous forme d’études comparatives, est nécessaire pour des fins décisionnelles. L’importance stratégique de ce sujet de recherche pour Bombardier Aéronautique réside dans le fait que plusieurs concurrents, dont Boeing et Airbus, utilisent déjà les matériaux composites sur leurs plus récents avions ou leurs projets majeurs, qui sont à un état avancé. Du point de vue certification, une meilleure compréhension des propriétés des matériaux composites est requise pour la révision de certaines normes, procédures, recommandations et limites opérationnelles. De plus, dans le contexte du développement de nouvelles technologies et systèmes de génération et de distribution électrique pour le concept d’un “avion plus électrique” [16], la recherche sur les propriétés électriques des matériaux composites est un prérequis essentiel.

1.4 Plan du mémoire

Suite à l’introduction, le chapitre 2 présente la revue de littérature en organisant les multiples références consultées pour ce projet. Les chapitres 3 à 6 inclusivement présentent les étapes du projet dans l’ordre décrit par le tableau 1.3. Le chapitre 7 termine le mémoire avec une conclusion qui revient sur les résultats, les observations et les points importants soulevés dans le document.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Bien que plusieurs articles soient cités en introduction, une courte revue de littérature permet de faire ressortir la structure du processus de recherche littéraire.

2.1 Généralités

Comme mise en contexte, la littérature et les articles regorgent d'information sur l'avancement de la recherche dans le domaine aérospatial. D'un point de vue électrique, une mise en contexte implique d'aborder quelques articles concernant les architectures de génération et distribution électrique des avions et les tendances futures, par exemple celle des avions plus électriques (MEA) [16, 17], qui aura un impact sur l'ensemble de l'architecture électrique des avions. Ce type d'article permet de prendre connaissance des équipements électriques présents sur les avions ainsi que des charges actuelles et envisagées.

D'autres articles à caractère général présentent des informations sur les matériaux composites utilisés en aéronautique, que ce soit les composites de carbone ou autres [1, 5, 6, 7, 2]. Les avantages reliés au composite de carbone face aux fuselages d'aluminium sont également très bien résumés dans un livre publié par la AIAA [8], qui présente aussi quelques aspects mécaniques relativement à la fabrication de ces matériaux.

2.2 Problématique de retour de courant

Bien que la littérature concernant la problématique de retour de courant n'était pas très documentée au début de ce projet, quelques articles intéressants sont publiés en date de la rédaction de ce mémoire. On essaie, entre autre, d'optimiser la configuration d'un réseau de retour de courant pour différents équipements embarqués de façon similaire à ce que l'on fait en électronique pour un circuit imprimé [18]. Il est à noter que cette approche implique, a priori, un réseau de retour de courant indépendant du fuselage en composite.

Comme certains constructeurs sont très avancés dans leur processus d'avions composites, il est intéressant de noter que des brevets ont été émis pour les réseaux de retour de courant. Par exemple, un brevet [19] expose une solution de retour par l'intermédiaire de matrices métalliques conductrices construites d'une seule pièce et pouvant être installées, par exemple, sous le plancher de l'avion.

Dans certains livres [4], on retrouve fréquemment la solution de maillage de cuivre intégré aux composites, du moins localement autour d'un point de connexion électrique entre un conducteur et le composite. Il est à noter que cette solution implique l'utilisation du fuselage pour le retour du courant, tel qu'il est question dans ce mémoire.

2.3 Résistivité électrique du composite de carbone

Les données présentées dans les articles reliés à la résistivité électrique de matériaux composites de carbone varient beaucoup selon la recette des matériaux composites utilisés. Par exemple, certains utilisent des composites formés de particules de carbone mélangées à la résine au lieu de tissages de fibres [20], comme il est question dans ce mémoire. Ceci change complètement la nature des données puisque le carbone, étant a priori la composante principale qui assure la conduction électrique dans un mélange carbone-résine, n'est parfois pas sous la même forme d'un article à l'autre. Le mécanisme de conduction devrait donc être différent. Dans d'autres cas [15], le nombre de couches ou l'orientation des fibres des composites sont différents, mais ces références sont tout de même d'intérêt. Suivant cet ordre d'idées, plusieurs autres travaux sont davantage orientés sur la mesure de la résistivité électrique pour la détection de dommages matériels [21, 22, 23, 24, 25].

Un autre type de travail qui a été réalisé implique la mesure de la résistivité électrique d'échantillons composites sous certaines conditions précises de contraintes mécaniques, dont la traction [14]. Cette relation entre la traction et la résistance électrique est souvent présentée sous l'angle piézoélectrique [13].

2.4 Caractérisation thermique du composite de carbone

Certains travaux ont été réalisés avec pour thème l'amélioration des propriétés thermiques des matériaux composites [26]. L'étude de référence principale pour l'aspect électrothermique des composites qui a été consultée considère également des mesures de résistance suivant une méthodologie très similaire à celle présentée dans ce mémoire [15].

2.5 Aspect électromagnétique

Par aspect électromagnétique, on entend ici la littérature reliée aux mesures de paramètres d'impédance des lignes électriques. Ce domaine de recherche est très bien documenté et il existe plusieurs articles publiés.

Plusieurs articles s'intéressent principalement à la formulation du problème de calcul des champs électriques autour de configurations de câbles à haute tension par la méthode

des éléments finis [27, 28, 29, 30, 31]. Ces articles sont surtout intéressants pour remarquer l'utilisation abondante de la méthode des éléments finis dans la résolution des problèmes électromagnétiques, et ce depuis plusieurs années.

Arrive ensuite le sujet des paramètres d'impédance, qui va de pair avec les phénomènes d'induction entre des conducteurs électriques. Ici, plusieurs articles ont été consultés pour tenter de lever certaines incertitudes, mais surtout pour avoir des scénarios de référence afin de valider des résultats de simulation. On remarque que pour les plus anciens articles [32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42], les méthodes de résolution utilisées plus algorithmiques, telles que les fonctions de Green et les approximations de Padé, permettent en général de résoudre des cas triviaux mais se compliqueraient pour des cas plus complexes. Ces articles sont toutefois intéressants et dignes de mention pour la validation d'outils de simulation en se basant sur les cas triviaux. Reflétant l'état des recherches actuelles, certains articles plus récents [43, 44, 45, 46] font plutôt usage d'outils numériques tel que le logiciel COMSOL Multiphysics.

2.6 Références industrielles

Certains documents du partenaire industriel ont été utilisés comme références. L'un des plus importants est un rapport préliminaire [9] à ce projet rédigé par l'ingénieure Mona Cherkaoui. Ce rapport préliminaire est utilisé principalement comme mise en contexte et constitue lui-même un résumé de plusieurs notions retrouvées dans la littérature relative à la compatibilité électromagnétique [3, 47].

2.7 Autres ressources d'intérêt

Pour l'élaboration d'un banc d'essai dédié aux mesures de résistivité, deux excellentes ressources bibliographiques ont permis de se familiariser avec l'environnement LabVIEW [48, 49]. De plus, un programme de référence développé par Antoine Bernier, un ancien stagiaire au Laboratoire en énergie électrique de l'École Polytechnique de Montréal, a constitué une bonne référence de départ pour l'élaboration d'un programme adapté à la situation actuelle.

Pendant l'été 2010, quelques expériences sur les propriétés électriques des matériaux composites ont été réalisées au Laboratoire en énergie électrique de l'École Polytechnique de Montréal par un stagiaire, M. Julien Vayrette [50]. Ses résultats sont brièvement discutés à l'annexe A.

Comme autre référence utile, on doit citer le mémoire d'un autre étudiant de l'École Polytechnique de Montréal, M. William Tsé, qui traite des propriétés électriques des mêmes matériaux composites [51] à haute fréquence. Dans le cadre du projet actuel, il est question

de courant continu. L'aspect le plus important ici est le fait que les matériaux composites utilisés par M. Tsé sont les mêmes que pour ce mémoire ; c'est-à-dire que les échantillons proviennent du même panneau, fourni par Bombardier Aéronautique. Les détails techniques de ces matériaux composites sont présentés en annexe B.

CHAPITRE 3

RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

3.1 Objectif du chapitre

La première hypothèse à vérifier est que la résistance électrique des échantillons de composite de carbone est trop élevée pour servir, tel quel, de médium primaire de retour de courant. Puisque la température ambiante varie beaucoup au cours d'un vol commercial, on tient à vérifier cette hypothèse dans le contexte d'une plage réaliste de températures ambiantes et donc de mesurer la résistance des échantillons de composite en fonction de la température ambiante.

Un autre facteur à considérer est l'orientation des fibres de carbone qui pourrait se traduire par un écart entre la conductivité suivant plusieurs directions. Il s'agit de l'anisotropie.

3.2 Méthodologie

3.2.1 Mesure de résistivité par la méthode à 4 points

Pour la mesure de la résistivité des échantillons, on utilise la méthode à 4 points, tel que montré à la figure 3.1. Cette méthode implique l'injection d'un courant dans l'échantillon par l'intermédiaire de 2 contacts, ainsi que la mesure d'une chute de tension à la surface de l'échantillon par l'intermédiaire de 2 autres points, ou sondes. L'avantage principal de cette méthode en comparaison avec une méthode plus classique à 2 points est l'élimination de l'effet de la résistance de contact.

À partir d'une chute de tension entre 2 points séparés d'une distance fixe, et en considérant le passage d'un courant connu dans les échantillons, on peut calculer la résistance entre les deux points de mesure par la formule 3.1.

$$\rho = \frac{VA}{IL} \quad [\Omega\text{m}] \quad (3.1)$$

Où ρ , V , A , I et L sont respectivement la résistivité (Ωm), la chute de tension entre les sondes de mesure de tension (V), la surface perpendiculaire au passage du courant (m^2), le courant circulant dans l'échantillon (A) et la distance entre les sondes de mesure de tension (m).

Il est possible d'utiliser plusieurs paires de sondes pour la mesure de la chute de tension, de varier la distance entre ces dernières, et de comparer les résultats. Théoriquement, les

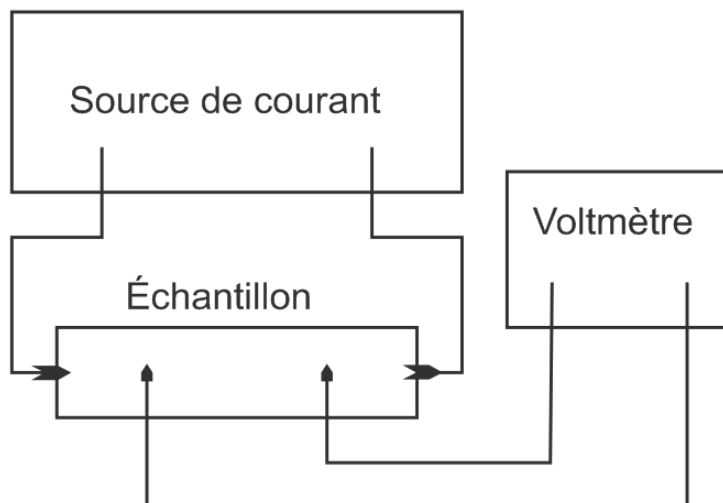


Figure 3.1 Mesure de la résistivité par la méthode à 4 points

résultats de résistivité doivent être comparables d'une paire de sondes à l'autre. Dans le cas actuel, on utilise 3 paires.

3.2.2 Contrôle de la température

Pour chaque essai, un courant est injecté dans l'échantillon sous forme impulsionnelle, à une température ambiante donnée. Des essais précédents réalisés avec une source différente (source Lambda), fournissant des impulsions assez longues, ont montré un certain échauffement des échantillons. Or, comme on cherche à garder le contrôle sur la température ambiante ainsi que celle de l'échantillon, on minimise la durée des impulsions de courant.

La température de l'échantillon est contrôlée par l'intermédiaire de thermocouples placés sur sa surface. Ces thermocouples servent seulement au contrôle du processus, et non à l'analyse thermographique.

3.2.3 Préparation des échantillons

Les échantillons testés proviennent d'un panneau gracieusement offert par Bombardier Aéronautique. Ces derniers sont donc tout à fait représentatifs de la réalité. Le panneau est composé de deux couches laminées de composite de carbone tenues ensemble par une structure polyamide en nid d'abeille. La couche de laminé faisant normalement face à l'extérieur de l'avion contient un maillage de cuivre faisant office de réseau de retour de courant de foudre. Pour cet essai, on considère seulement l'autre couche laminée, soit soit celle faisant face à l'intérieur de l'avion et qui n'est pas recouverte d'un maillage de cuivre.

On coupe deux échantillons de 1,5 cm par 20 cm dans le panneau primaire, suivant un angle de 90 degrés l'un par rapport à l'autre, tel que montré à la figure 3.2. De cette façon, on considère l'orientation des couches de fibres et une anisotropie, si existante, pourra être détectée.

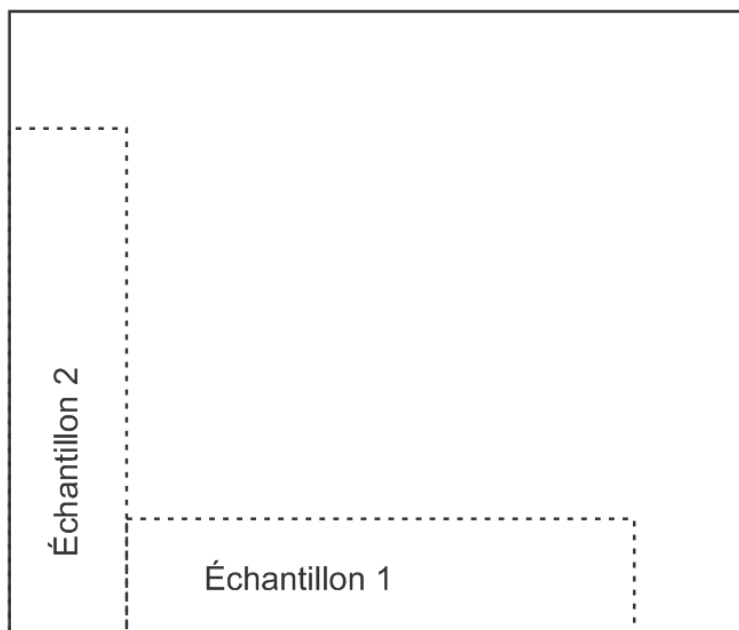


Figure 3.2 Échantillons 1 et 2 découpés à un angle relatif de 90 degrés

Le support à échantillon avec sondes est couramment utilisé au laboratoire pour des mesures de caractérisation électrique de supraconducteurs, supervisées par Frédéric Sirois. Le support en question est présenté à la figure 3.3.

Les contacts de cuivre à chaque extrémité sont les points d'injection du courant, tandis que les sondes de tension sont couramment appelées *pogo pins* dans l'industrie de l'électronique. Il s'agit de sondes mises en place et retenues à la surface de l'échantillon par pression, et donc par le support supérieur, tel qu'illustré à la figure 3.4. Pour s'assurer d'avoir de bons contacts électriques, la surface de l'échantillon est légèrement sablée afin de retirer la couche de résine non conductrice. De plus, un ruban d'indium est inséré entre les contacts d'injection du courant et la surface de l'échantillon, afin de maximiser la surface de contact. Il s'agit d'un élément métallique conducteur qui colle à chacune des surfaces en contact sous l'effet de la pression, épousant ainsi les irrégularités de chacune des surfaces.

Les 3 canaux de mesure de la tension sont connectés ainsi : le canal 1 est relié directement aux contacts de cuivre d'injection du courant, le canal 2 est relié à la paire de sondes extérieure ayant la plus grande séparation et le canal 3 est relié à la paire de sondes centrale ayant la plus

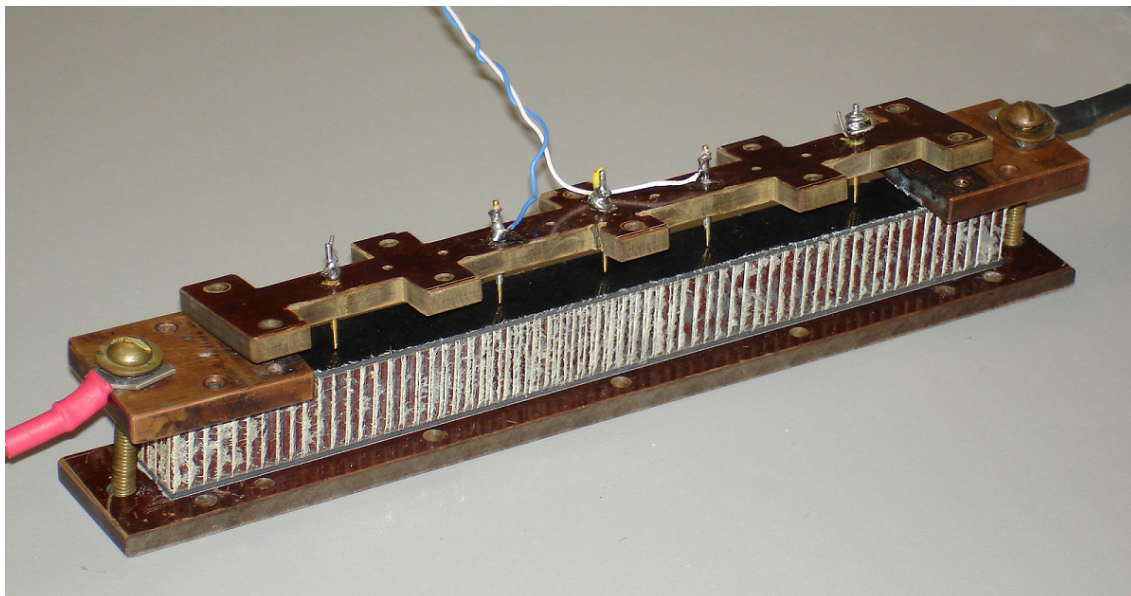


Figure 3.3 Support à échantillon avec composite de carbone complet

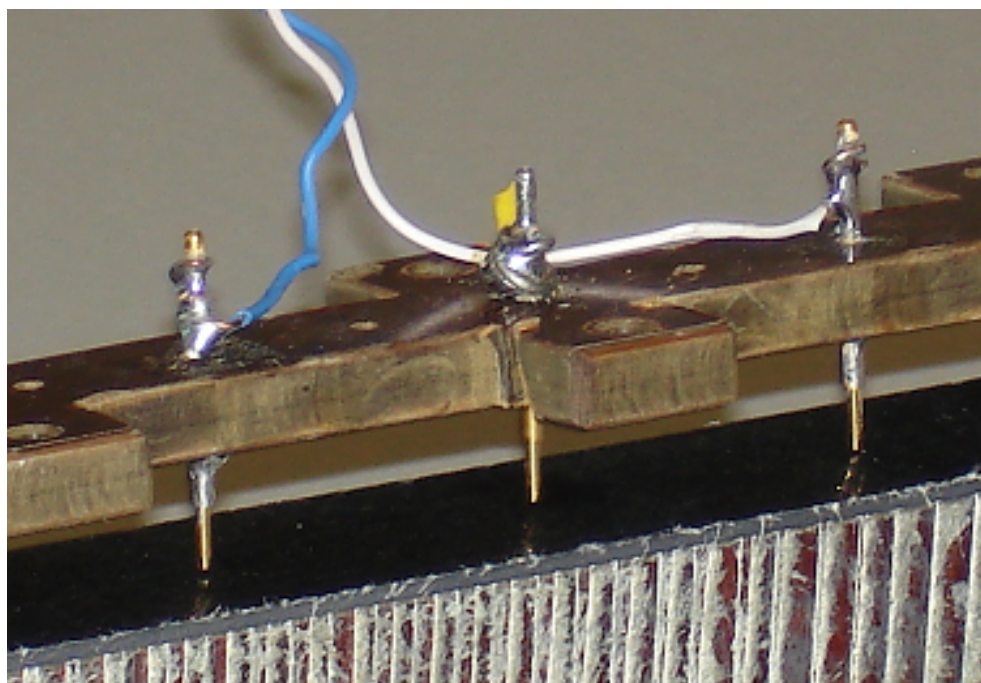


Figure 3.4 Sondes de tension appliquées par pression

petite séparation. La figure 3.5 montre la position de ces sondes en plus des thermocouples pour la mesure de la température.

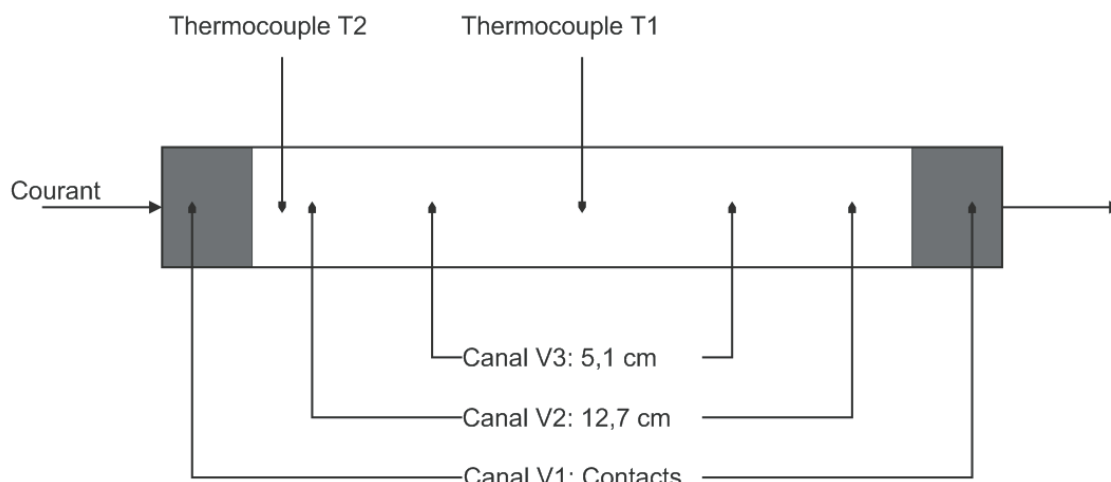


Figure 3.5 Position des sondes de tension et de température sur l'échantillon

3.2.4 Procédure

La procédure des essais est résumée dans le tableau 3.1. Des essais ont également été réalisés pour déterminer la durée optimale de l'impulsion. Voir l'annexe C à ce sujet.

Tableau 3.1 Algorithme de l'essai de résistivité

-
-
- Pour chaque température dans la plage $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ avec $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ d'incrément
 - Pour chaque valeur de courant dans la plage 1 A à 5 A avec $\frac{4}{19}$ A d'incrément
 1. Pour chaque paire de sondes de tension (3)
 - (a) Envoyer une impulsion de courant d'une durée de 50 ms
 - (b) Mesurer la chute de tension sur la paire de sondes
 2. Pour chaque canal de température (2)
 - (a) Mesurer la température
-
-

L'algorithme est implémenté sur LabVIEW pour automatiser la procédure d'essai. Avant chaque mesure, une lecture continue de la température est réalisée afin de s'assurer que cette dernière se situe dans une plage de contrôle donnée, soit autour de la température désirée pour l'essai. Cette variable de contrôle déclenche ensuite la procédure de mesure. Rappelons que le calcul de la résistivité électrique est fait selon l'équation 1.2 pour chaque canal de mesure.

3.2.5 Montage

Pour ce travail expérimental, un certain temps a été nécessaire afin de mettre au point le banc d'essai approprié basé sur une interface LabVIEW, l'instrumentation de mesure et la source de courant impulsionnelle. La figure 3.6 représente le schéma bloc.

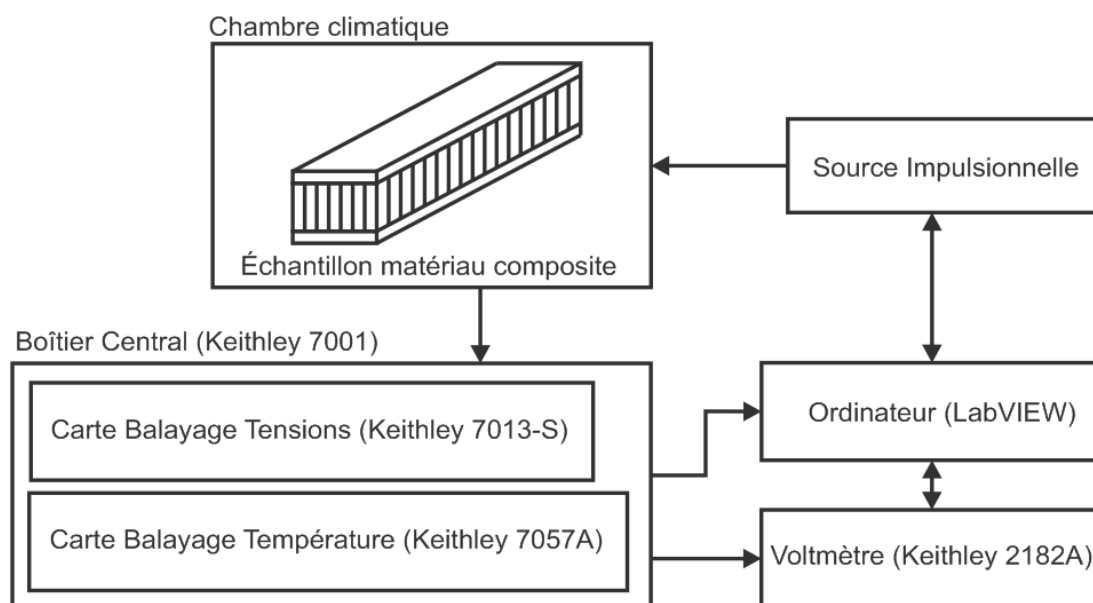


Figure 3.6 Schéma du montage expérimental

L'enceinte Keithley 7001 contient 2 cartes de balayage. La carte Keithley 7013-S est utilisée pour le balayage des 3 canaux de tension et la carte Keithley 7057A est dédiée aux 2 canaux de mesure de la température. Cette interface de balayage permet de diriger n'importe lequel des 5 canaux de mesure aux bornes du multimètre Keithley 2182A, tel que montré à la figure 3.7. La logique de contrôle est implémentée dans le programme LabVIEW et la communication entre l'instrumentation se fait suivant le protocole GPIB.

Pour ajuster et maintenir la température ambiante à une certaine valeur, on utilise une chambre climatique Thermotron en mode manuel. Celle-ci est présentée à la figure 3.8.

Une source de courant impulsionnelle a été conçue à l'École Polytechnique de Montréal [52], et l'un de ces modules a été utilisé pour ce montage. Avec la possibilité d'avoir de très courtes impulsions qui commandent un circuit MOSFET IRF 540, la source fournit des impulsions de courant carrées de 50 ms de durée et jusqu'à 5 A d'amplitude. Le schéma du circuit est présenté à la figure 3.9.

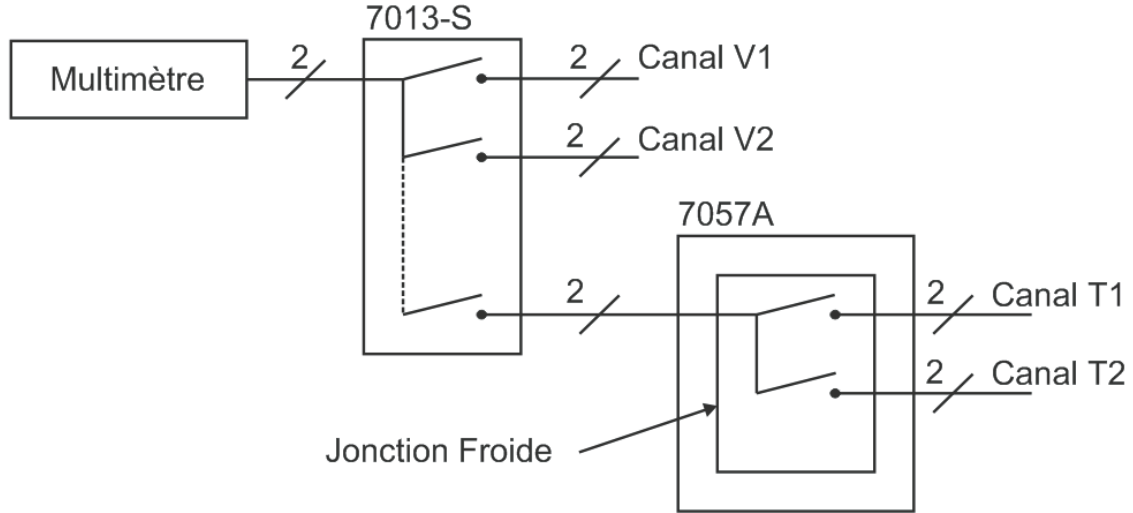


Figure 3.7 Détails internes de l'enceinte Keithley 7001

3.3 Résultats

3.3.1 Résistivité en fonction de la température

Suite aux mesures effectuées, on obtient les résultats présentés aux figures 3.10 et 3.11. On obtient les paramètres de l'équation 3.2 par ajustement de courbe avec l'outil MATLAB *cftool*.

$$\rho(T) = \rho_{20} + k(T - T_{20}) \quad [\Omega\text{m}] \quad (3.2)$$

Où $\rho(T)$, ρ_{20} , k , T et T_{20} sont respectivement la résistivité à la température T (Ωm), la résistivité à 20 °C (Ωm), le coefficient de variation de la résistivité selon la température ($\frac{\Omega\text{m}}{^\circ\text{C}}$), la température T ($^\circ\text{C}$) et la température de 20 °C.

Les figures 3.10 et 3.11 présentent les résultats pour le canal 2 seulement, puisque ceux du canal 3 sont très similaires. Ceci permet la validation des résultats, ce qui est le but recherché, du fait de l'utilisation de 3 canaux. Pour la canal 1, les résultats ne sont pas utiles car ils semblent aléatoires. Ceci s'explique par le fait que la mesure de la différence de potentiel inclut la résistance de contact et qu'une distribution de la pression des contacts de cuivre plus ou moins uniforme sur l'échantillon à tester résulte en des surfaces de densité de courant plus importantes que d'autres.

La première chose à remarquer est le coefficient négatif k de la relation entre la résistivité électrique et la température. Puisqu'en théorie ce coefficient est négatif pour le carbone pur, on observe qu'à l'intérieur de cette plaque de courant et de température, les fibres de carbone



Figure 3.8 Chambre climatique Thermotron

semblent contribuer grandement à la conductivité de l'échantillon contrairement à la résine.

La situation serait probablement différente à plus haute température ou sous l'influence d'un courant beaucoup plus élevé dû à la fonte de la résine et la possible délamination de l'échantillon. Dans ce cas, les fibres de carbone auraient tendance à se réarranger différemment, présentant peut-être entre eux des points de contact locaux. Il est à noter que l'on ne désire pas atteindre une température qui cause la fonte de la résine ou la délamination.

Même si la variation mesurée de la résistivité électrique en fonction de la température est de faible amplitude, le concept de coefficient négatif doit être mis en perspective dans le domaine aérospatial, où de grandes variations sont attendues. Puisque le coefficient est positif pour les alliages métalliques tel que l'aluminium et le cuivre, la sélection de conducteurs électriques suivant un courant donné considère le fait qu'une température basse contribue à une capacité de transport de courant plus importante. Ainsi, la pratique est de ten-

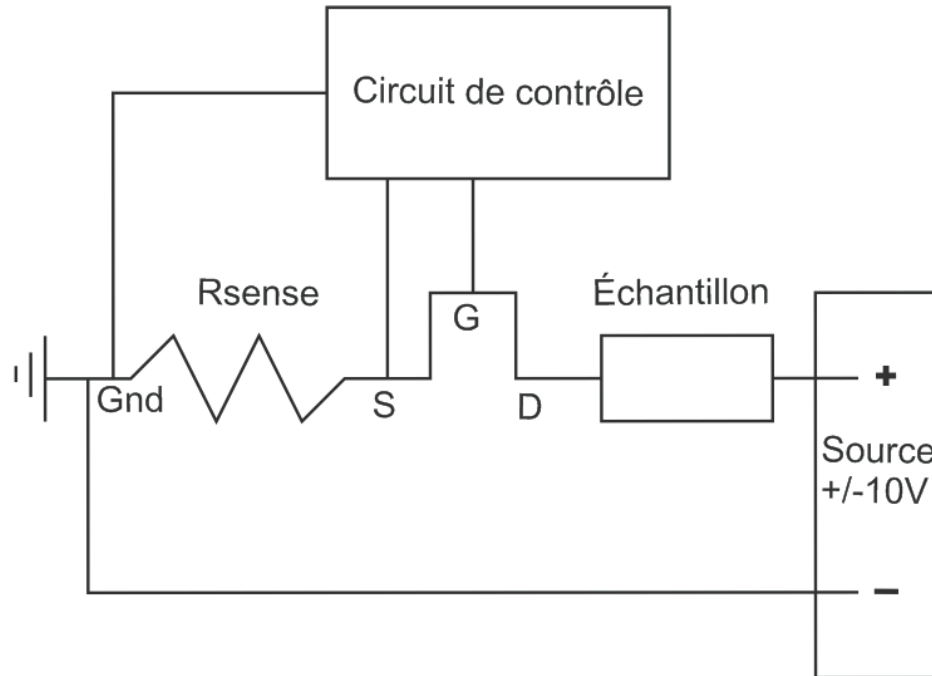


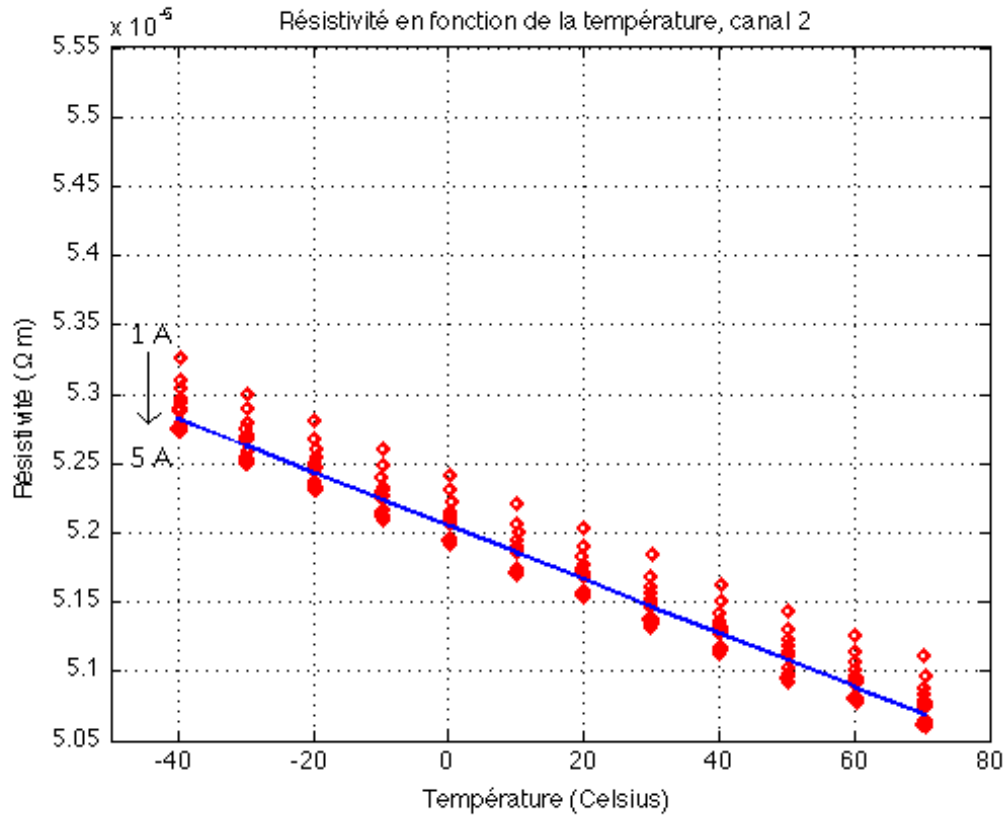
Figure 3.9 Détails du circuit

ter de garder les conducteurs dans un environnement froid en essayant de minimiser l'effet d'échauffement ou d'utiliser la ventilation si nécessaire.

Si ce composite de carbone était utilisé comme médium primaire de retour de courant, il doit être noté qu'un environnement froid tel que celui rencontré en vol à haute altitude positionnerait le composite dans sa plage opérationnelle la plus résistive. Ceci est vrai principalement pour la partie laminée se trouvant à l'extérieur de l'avion, qui est soumise à des températures plus extrêmes. Dans cette situation, la différence entre la résistivité du composite et son environnement éventuellement métallique serait encore plus marquée. On observe que de plus importantes investigations sont nécessaires concernant l'interface entre le composite de carbone et les matériaux métalliques.

Le tableau 3.2 présente les valeurs de résistivité électrique de quelques matériaux structuraux utilisés en aéronautique en plus des résultats mesurés.

À partir de ce tableau, on note que l'anisotropie observée pour ces échantillons de composite de carbone n'est pas significative. Ceci pourrait s'expliquer par une complémentarité dans l'orientation des couches de fibres dans lesquelles le courant circule. Ainsi, même si l'angle de coupe relatif entre les échantillons est de 90° , on pourrait avoir deux orientations de fibres similaires. En fait, il serait possible d'observer un certain pourcentage similaire de couches de fibres orientées dans la même direction, mais sur deux couches différentes dans la



$$\rho_{20} = 5,16632 \cdot 10^{-5} \Omega m, k = -1,934 \cdot 10^{-8} \frac{\Omega m}{^{\circ}C}$$

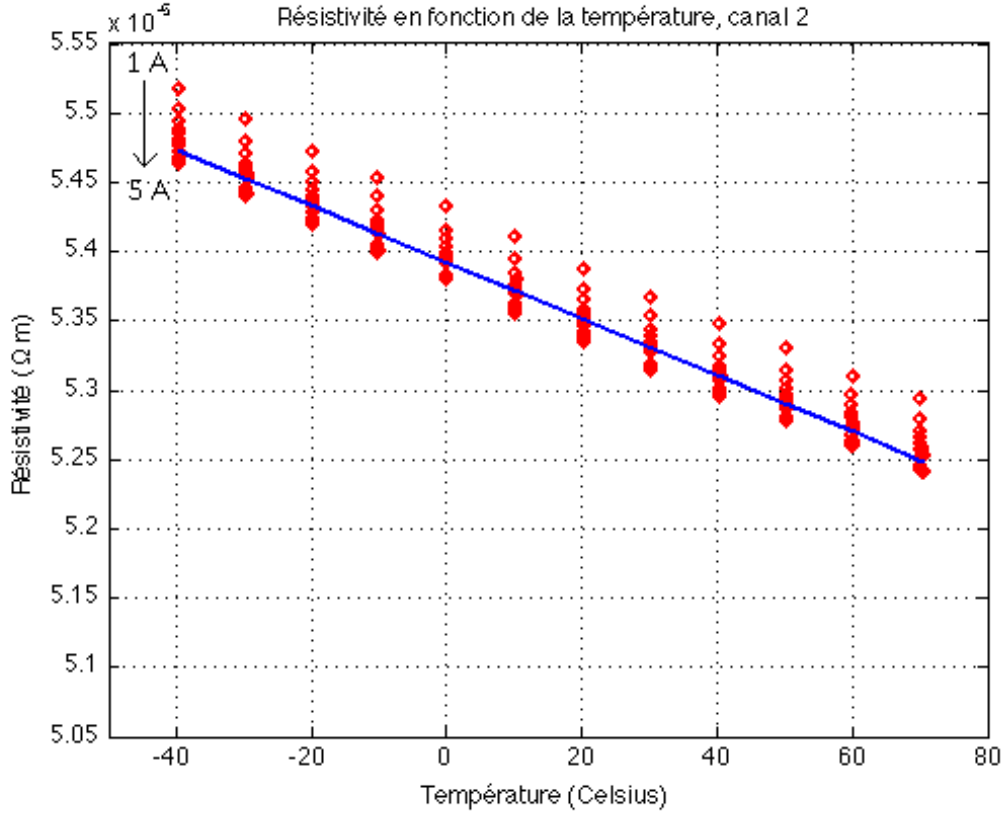
Figure 3.10 Résistivité électrique, échantillon 1, canal 2

Tableau 3.2 Résistivité électrique des échantillons testés de composite de carbone et de matériaux métalliques utilisés en aéronautique

Matériaux	Résistivité ($\Omega \cdot m$) à 20°C
Échantillon composite 1	$5,16632 \cdot 10^{-5}$
Échantillon composite 2	$5,3513 \cdot 10^{-5}$
Aluminium 2024-T3	$5,7 \cdot 10^{-8}$ [53]
Aluminium 7075-T6	$5,22 \cdot 10^{-8}$ [53]
Cuivre	$1,72 \cdot 10^{-8}$ [54]

matrice de résine, selon chacun des échantillons. De cette façon, les résultats souligneraient le fait que le courant se distribue sur toute l'épaisseur de l'échantillon, mais il est nécessaire de faire davantage de recherche sur ce sujet avant de conclure.

Dans le tableau 3.2, on peut aussi voir que la résistivité électrique du composite de carbone peut être considérée comme environ 1000 fois plus élevée que celle des alliages d'aluminium utilisés pour le revêtement du fuselage d'avions, et environ 3000 fois plus élevée que pour le



$$\rho_{20} = 5,3513 \cdot 10^{-5} \Omega\text{m}, k = -2,035 \cdot 10^{-8} \frac{\Omega\text{m}}{^{\circ}\text{C}}$$

Figure 3.11 Résistivité électrique, échantillon 2, canal 2

cuivre, ceci à 20 °C. Notons que ce ratio est encore plus important à basse température.

3.3.2 Résistivité en fonction du courant

En se référant de nouveau aux figures 3.10 et 3.11, on remarque que pour une température donnée, la variation des mesures de résistivité présente un schéma très similaire d'un cas de température à l'autre. En fait, on remarque que la résistivité mesurée diminue avec une augmentation du courant.

Cette caractéristique a été également observée par Zantout [55] qui l'explique avec la relation entre la résistance de contact des électrodes d'application de courant et la surface du composite. Suivant cette logique, il est vrai que la résistance de contact pour les métaux, tel le cuivre, diminue avec une augmentation du courant [56] et le principe serait similaire pour l'interface composite-cuivre. Pour un courant donné, des points locaux se forment à l'interface entre deux matériaux afin de faire circuler le courant [57, 58]. Lorsque le courant augmente, la température augmente également sous l'effet Joule, et les matériaux à l'interface deviennent

légèrement plus souples, ce qui change les propriétés de l'interface en créant de nouveaux points locaux et donc en diminuant la résistance d'interface [55]. Ceci serait toujours vrai dans le cas des matériaux composites qui présentent une surface encore plus hétérogène à l'interface, c'est-à-dire un composé de fibres et de résine. Cette explication concerne les contacts de courant.

Pour les contacts de mesure de la tension, le courant circulant dans le voltmètre est très faible. Il est possible qu'un courant plus élevé dans l'échantillon crée un léger échauffement des fibres de carbone, ce qui les rendrait plus conductrices. En effet, les figures 3.10 et 3.11 montrent qu'une température plus élevée résulte en une résistivité plus faible. Il est également possible qu'un courant plus élevé permette une meilleure transition du courant vers les couches inférieures de fibres de carbone. Ces hypothèses restent à vérifier.

3.3.3 Estimations

En revenant sur l'hypothèse initiale concernant l'utilisation du composite de carbone comme médium primaire de retour de courant, on utilise les résultats précédents pour faire une estimation de base.

À partir des dimensions générales du Global 5000 [59], soit l'un des avions fabriqués par Bombardier Aéronautique, on peut dimensionner un cylindre représentant une version extrêmement simplifiée du revêtement de cet avion pour la section de la cabine des passagers, tel que représenté à la figure 3.12.

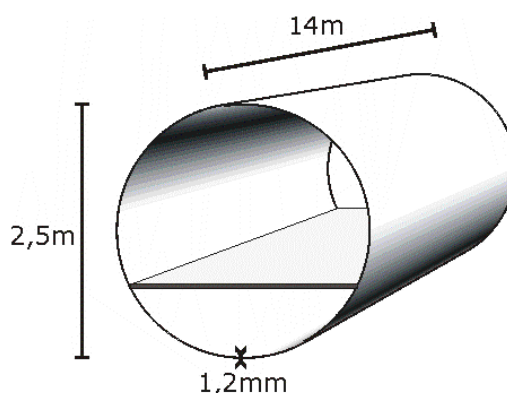


Figure 3.12 Cabine des passagers simplifiée du Global 5000

Il s'agit d'une représentation simplifiée et optimiste puisque l'on ne considère pas les fenêtres ni les joints qui existent entre les panneaux adjacents du fuselage. Ces objets donneraient une estimation plus élevée de la résistance du cylindre. D'autres particularités comme la différence d'épaisseur de composite d'un endroit à l'autre de l'avion sont également négligés.

Pour estimer la résistance électrique longitudinale du cylindre, on utilise les équations 3.3 et 3.4.

$$R = \rho(T) \cdot \frac{L}{A} \quad [\Omega] \quad (3.3)$$

$$R = \rho(T) \cdot \frac{L}{\pi[(r + 1,2 \text{ mm})^2 - r^2]} \quad [\Omega] \quad (3.4)$$

Où R , $\rho(T)$, L , A et r sont respectivement la résistance (Ω), la résistivité à une température T (Ωm), la longueur du cylindre (m), la surface du cylindre perpendiculaire au passage du courant (m^2) et le rayon interne du cylindre (m).

À partir de valeurs réalistes de courant continu généré par les redresseurs d'un avion, soit les TRU situés dans le nez de l'avion comme pour le Global 5000, on peut évaluer la chute de tension longitudinale due au courant de retour. Pour une estimation légèrement plus réaliste, on divise le cylindre en 4 sections d'égale longueur de 3,5 m. Dans chacune, on considère une distribution de $\frac{1}{4}$ de la charge totale de 600 A, soit 150 A. Ainsi, pour que le courant continu retourne à la source se trouvant dans le nez de l'avion, il doit passer par chaque station. Dans la 4^e et dernière station, on retrouve donc un courant de retour de 150 A. Dans la 3^e station, un total de 300 A retourne vers la source, soit le courant de 150 A des équipements situés à la station 3 et le courant venant de la station 4. Suivant le même principe, 450 A circulant dans la station 2 et 600 A dans la station 1. La chute de tension totale est simplement la somme de la chute de tension longitudinale pour chaque section suivant les équations 3.5 à 3.8. Les résultats sont reportés dans le tableau 3.3.

$$V_{total} = V_4 + V_3 + V_2 + V_1 \quad [\text{V}] \quad (3.5)$$

Avec :

$$V_i = R_i I_i \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad [\text{V}] \quad (3.6)$$

Et :

$$R_i = \frac{R_{cyl}}{4} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad [\text{V}] \quad (3.7)$$

On a donc :

$$V_{total} = \sum_{i=1}^4 \frac{R_{cyl}}{4} I_i \quad [\text{V}] \quad (3.8)$$

Pour mesurer l'importance des chutes de tension, on doit noter que la tension usuelle sur les systèmes de distribution à courant continu des avions est de 28 V_{DC} [16]. Dans le futur, il sera également envisageable de rencontrer des systèmes à 270 V_{DC} [16]. Pour chacun de ces cas, il est clair que les estimations de chute de tension sont beaucoup trop importantes,

Tableau 3.3 Résistance et chutes de tension

Matériaux	Résistance ($\text{m}\Omega$)	Chute de tension (V)
Échantillon composite 1	76,71	28,76
Échantillon composite 2	79,45	29,79
Aluminium 2024-T3	0,08	0,03

spécialement pour le cas du 28 V_{DC} . En effet, on observe une chute de tension du même ordre de grandeur que la tension d'alimentation, soit $28 - 30 \text{ V}_{DC}$.

En se basant sur ces résultats, il est clair que le composite de carbone considéré ici est beaucoup trop résistif pour servir, tel quel, de médium primaire de retour de courant.

CHAPITRE 4

DISTRIBUTION DU COURANT CONTINU

4.1 Objectif du chapitre

Dans ce chapitre, on cherche à investiguer la manière dont le courant continu se distribue dans le composite de carbone laminé, en surface et sur l'épaisseur de ce dernier.

On réalise également une estimation de la résistance de contact entre l'électrode d'injection de courant et la surface du composite.

4.2 Méthodologie

4.2.1 Mesure matricielle de chutes de tensions

Pour établir un profil de distribution du courant continu circulant dans le composite, on désire réaliser une série de mesures de chutes de tension en surface et en dessous d'un échantillon. À partir de ces mesures, il est possible de faire ressortir les courbes équipotentielles et surtout d'évaluer la diffusion du courant sur chacun des plans, soit sur les surfaces supérieures et inférieures. Chaque mesure de tension est prise entre la surface et le point de référence qui est l'électrode de retour de l'échantillon. La figure 4.1 illustre le principe.

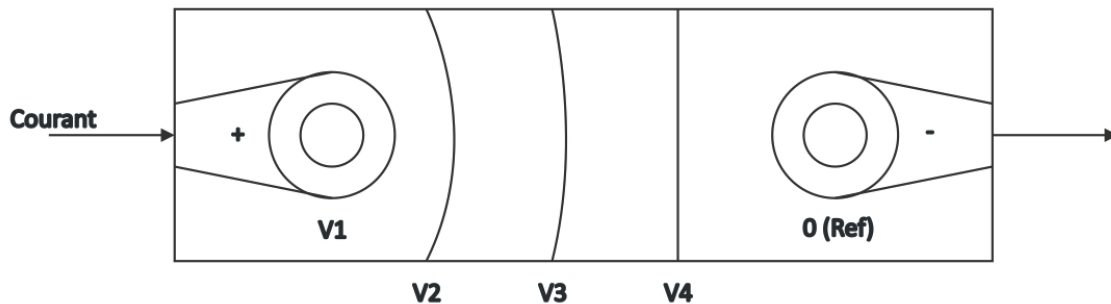


Figure 4.1 Courbes équipotentielles sur le composite

Pour réaliser ce type de mesure, il suffit tout d'abord d'injecter un courant continu connu dans un échantillon du composite à tester. Il est important d'injecter le courant seulement sur la surface de l'échantillon et non pas sur l'intrados et l'extrados en même temps, sinon cela invalide l'objectif recherché ici, qui est de voir comment le courant se diffuse dans tout le volume de l'échantillon.

4.2.2 Résistance d'interface

À partir des mesures, on veut estimer la résistance à l'interface entre le connecteur métallique, soit le point d'injection du courant dans l'échantillon, et le volume du composite. La figure 4.2 représente l'allure des résultats que l'on cherche à obtenir pour ce qui est du plan longitudinal de l'échantillon.

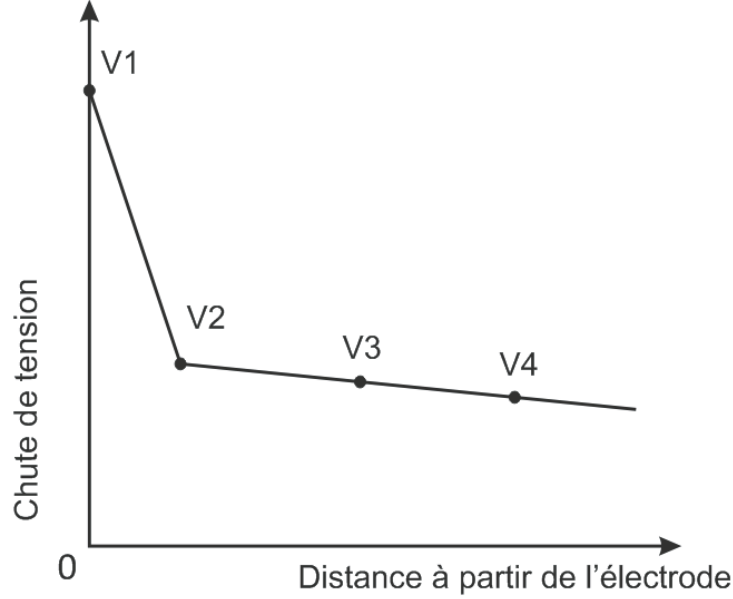


Figure 4.2 Manifestation de la résistance de contact

L'axe des abscisses représente la distance depuis l'électrode d'injection de courant (+) et l'axe des ordonnées la tension mesurée en chacun des points le long de l'axe. À une distance relativement éloignée du point d'injection de courant, la pente de la courbe est dictée uniquement par la résistance du composite. Cependant, à proximité du connecteur, une pente différente implique l'ajout de la résistance de contact en plus de celle du composite. On veut utiliser ce point de changement de pente dans la courbe pour estimer la résistance de contact effective de l'électrode. Illustrons le principe avec la formule 4.1.

$$R_{Cont} = \frac{V_1 - V_2}{I} \quad [\Omega] \quad (4.1)$$

Où R_{Cont} , V_1 , V_2 , et I sont respectivement la résistance de contact (Ω), la tension à l'électrode d'injection de courant (V), la tension au point de changement de pente (V) et le courant circulant dans l'échantillon (A).

4.2.3 Préparation de l'échantillon

Le composite utilisé dans ces essais est le même que précédemment, soit le laminé qui fait normalement face à l'intérieur de l'avion.

Pour cet essai, on coupe un nouvel échantillon de 2,5 cm par 10,5 cm comme illustré à la figure 4.3. Étant donné que des mesures sont effectuées sur les deux faces du composite laminé, la structure en nid d'abeille est découpée, et les résidus de résine sont poncés le plus près possible de la surface du composite. Comme cette étape est délicate, elle est réalisée manuellement. Le dessus du laminé est également poncé afin de permettre de bons contacts électriques lors de la mesure de chutes de tension. L'échantillon présente un poids de 5 g.

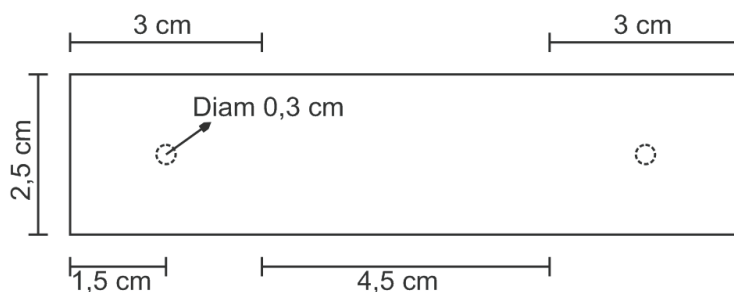


Figure 4.3 Schéma de coupe de l'échantillon pour les essais relatifs à la diffusion du courant dans le composite

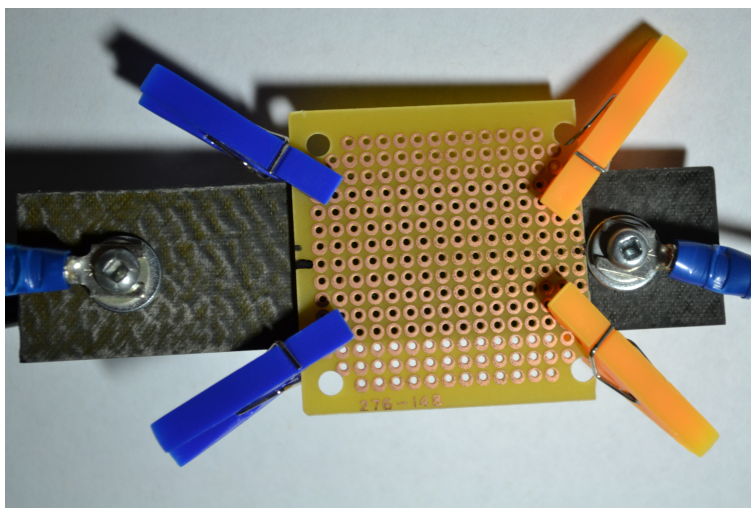


Figure 4.4 Échantillon de composite pour les essais relatifs à la diffusion du courant dans le composite

Au lieu d'utiliser le support à échantillon du chapitre précédent, on choisit de percer des trous à chaque extrémité afin d'utiliser des électrodes formées de boulons et de cosses. De

cette façon, on obtient une configuration plus représentative d'une réelle connexion de retour de courant par l'intermédiaire du composite de carbone.

Pour isoler le contact électrique entre la surface supérieure du composite et les autres couches, les filets du boulon sont recouverts d'un ruban adhésif isolant et la rondelle de retenue sous l'électrode est en plastique, donc également isolante. Le contact électrique se fait alors uniquement en surface.

Une carte de circuit imprimé comportant une matrice de vias est utilisée sur chaque côté, comme repère matriciel des mesures de chute de tension. Le montage de l'échantillon est tel que présenté à la figure 4.4 pour l'une des faces. Lors des mesures, une deuxième carte est placée derrière. Pour le même courant, les mesures sont donc réalisées entièrement sur l'une des faces, et ensuite entièrement sur l'autre.

4.2.4 Procédure

La procédure des essais est résumée dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 Algorithme des essais relatifs à la diffusion du courant dans le composite

-
-
- Injection d'un courant de 0,5A dans l'échantillon
 - Pour la face supérieure de l'échantillon, mesure de la chute de tension de chacun des points délimités par le guide matriciel (circuit imprimé)
 - Pour la face inférieure de l'échantillon, mesure de la chute de tension de chacun des points délimités par le guide matriciel (circuit imprimé)
-
-

4.2.5 Montage

En plus de l'échantillon, le montage expérimental comprend une source de courant continu Dazheng PS-305D de 0 à 5 A (0 à 15 V) ainsi qu'un multimètre numérique Fluke 8840A, tel que présenté à la figure 4.5.

4.3 Résultats

4.3.1 Profils de distribution

Les mesures de tension réalisées sur chacune des faces sont tout d'abord rapportées en détail dans les tableaux 4.2 et 4.3. Dans ces tableaux, la légende indique la distance en millimètres relativement au centre de l'électrode. Cette dernière se trouve donc au point

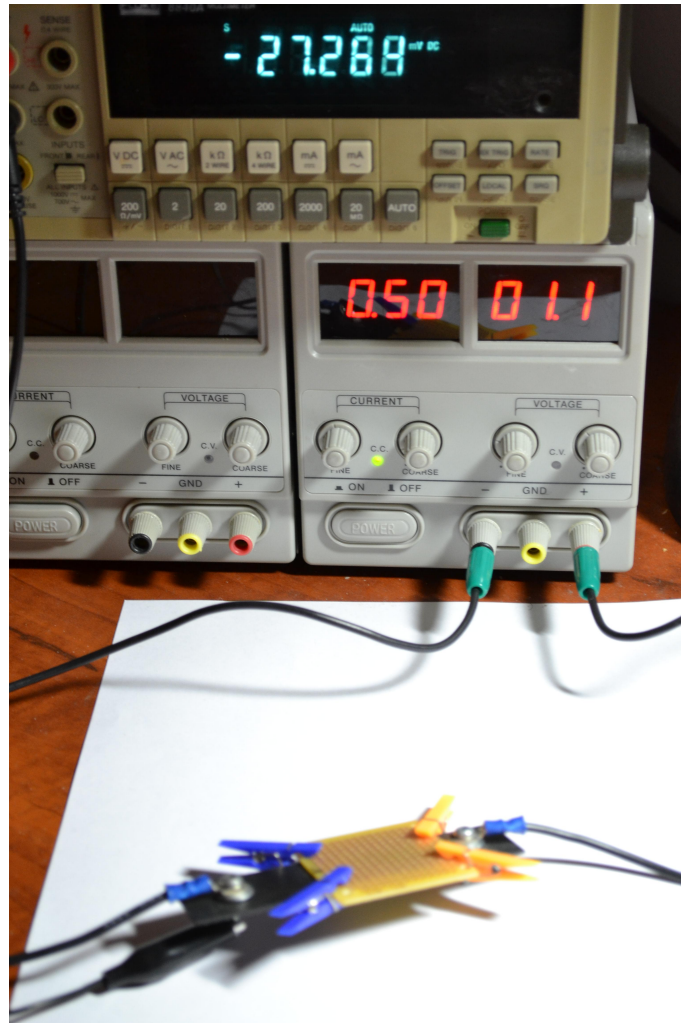


Figure 4.5 Montage expérimental pour les essais relatifs à la diffusion du courant dans le composite

$[0,0]$, soit à l'origine. On représente également les résultats graphiquement sur les figures 4.6 et 4.7, qui montrent les profils équipotentiels dans les plages d'intérêt.

Le premier aspect à remarquer est que l'on mesure des chutes de tension non négligeables sur la face inférieure alors que le courant est appliqué uniquement sur la face supérieure. L'amplitude de ces mesures, similaire à celle de la face supérieure et égale en certains points, montre que le courant passe bel et bien de la couche supérieure du composite de carbone à la couche inférieure en circulant par les différentes couches intermédiaires.

Il semble cependant que le point d'injection du courant lors des essais ne soit pas au centre de l'électrode tel que prévu, mais plutôt décalé d'un côté, soit vers le haut de la figure 4.6. Ceci amène à réfléchir à plusieurs causes possibles discutées dans les paragraphes subséquents. Il serait important de les considérer lors de la conception de solutions de retour

Tableau 4.2 Chutes de tension sur la face supérieure du composite (V)

Dist. (mm)	-10	-7,5	-5	-2,5	0	2,5	5	7,5	10
0					1,134				
1	1,003	1,006	1,007	1,009	1,016	1,019	1,021	1,038	1,036
3,5	1,001	1,003	1,004	1,005	1,008	1,014	1,020	1,023	1,032
6	0,999	1,000	1,001	1,002	1,004	1,005	1,010	1,016	1,019
8,5	0,996	0,998	0,998	0,999	1,001	1,001	1,004	1,008	1,014
11	0,994	0,996	0,995	0,995	0,998	0,999	1,001	1,003	1,006
13,5	0,991	0,993	0,993	0,993	0,995	0,995	0,998	1,000	1,002
16	0,990	0,990	0,990	0,991	0,993	0,993	0,995	0,996	0,998
18,5	0,988	0,987	0,988	0,988	0,990	0,990	0,992	0,993	0,996
21	0,986	0,985	0,985	0,985	0,987	0,988	0,990	0,990	0,992
23,5	0,982	0,983	0,983	0,983	0,985	0,985	0,986	0,988	0,989
26	0,979	0,980	0,981	0,981	0,982	0,982	0,984	0,985	0,988
28,5	0,978	0,978	0,978	0,978	0,980	0,980	0,981	0,983	0,985
31	0,975	0,976	0,975	0,975	0,977	0,978	0,980	0,980	0,982
33,5	0,974	0,974	0,973	0,973	0,975	0,976	0,977	0,977	0,980
36	0,972	0,972	0,971	0,970	0,972	0,974	0,975	0,975	0,977
38,5	0,969	0,969	0,968	0,968	0,970	0,970	0,973	0,973	0,975

Tableau 4.3 Chutes de tension sur la face inférieure du composite (V)

Dist. (mm)	-10	-7,5	-5	-2,5	0	2,5	5	7,5	10
0					1,134				
1	0,993	0,993	0,994	0,993	0,993	0,993	0,995	0,995	0,996
3,5	0,991	0,992	0,992	0,993	0,992	0,992	0,993	0,994	0,994
6	0,990	0,990	0,990	0,991	0,991	0,991	0,992	0,992	0,993
8,5	0,988	0,989	0,989	0,990	0,989	0,990	0,991	0,991	0,992
11	0,987	0,988	0,988	0,989	0,988	0,989	0,989	0,990	0,990
13,5	0,985	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,989	0,988
16	0,984	0,985	0,985	0,986	0,986	0,986	0,986	0,987	0,987
18,5	0,983	0,983	0,984	0,984	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985
21	0,981	0,981	0,981	0,983	0,983	0,984	0,983	0,984	0,984
23,5	0,979	0,980	0,979	0,982	0,980	0,983	0,982	0,982	0,982
26	0,978	0,979	0,978	0,980	0,979	0,981	0,980	0,981	0,980
28,5	0,976	0,978	0,976	0,978	0,977	0,980	0,978	0,979	0,978
31	0,975	0,977	0,974	0,976	0,975	0,978	0,977	0,977	0,977
33,5	0,974	0,975	0,973	0,973	0,973	0,976	0,975	0,975	0,976
36	0,972	0,972	0,971	0,972	0,972	0,974	0,973	0,974	0,975
38,5	0,971	0,971	0,969	0,970	0,971	0,971	0,971	0,973	0,973

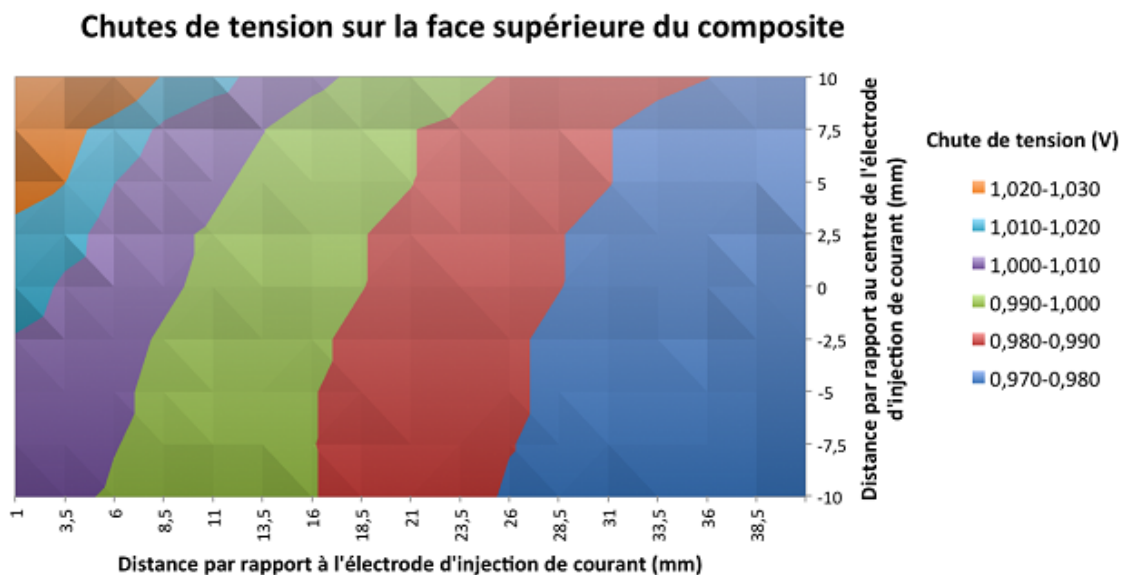


Figure 4.6 Chutes de tension sur la face supérieure

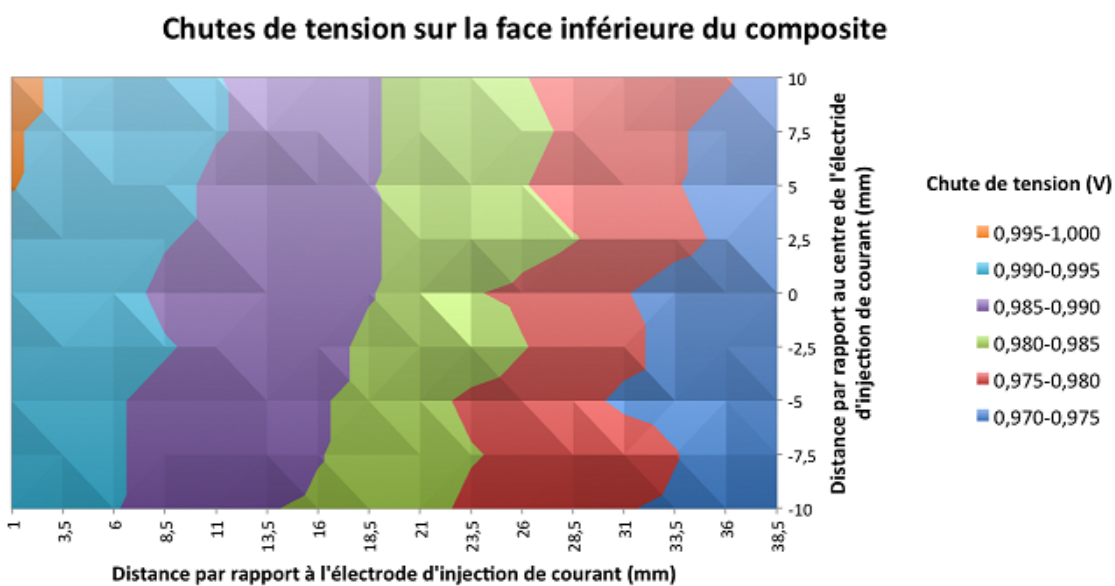


Figure 4.7 Chutes de tension sur la face inférieure

de courant utilisant, même en partie, le composite de carbone.

Couple de serrage du boulon

Pour ce qui est du couple de serrage du boulon du groupe électrode, une plus grande pression exercée sur l'un des côté entre les rondelles de l'électrode et la surface du composite faciliterait le passage du courant à cet endroit, ce qui décentraliserait la distribution du courant à proximité de l'électrode. On remarquerait alors l'apparition de points chauds à certains endroits autour de l'électrode, ainsi qu'un déséquilibre de chutes de tensions sur toute sa circonférence. On revient sur quelques observations à ce sujet dans la dernière section de ce chapitre.

Préparation de la surface

Il est aussi possible qu'un déséquilibre dans le sablage de la surface du composite crée des canaux de conduction préférentiels autour de l'électrode. Ce cas est facilement reproductible en pratique puisque la surface du composite de carbone est plutôt irrégulière.

Centrage des rondelles de l'électrode

Entre la cosse et la surface du composite, on retrouve une rondelle métallique centrée sur le boulon. Si cette rondelle est décentrée, la surface d'interface entre cette dernière et le composite ne serait pas la même sur toute sa circonférence. La figure 4.8 illustre ce cas.

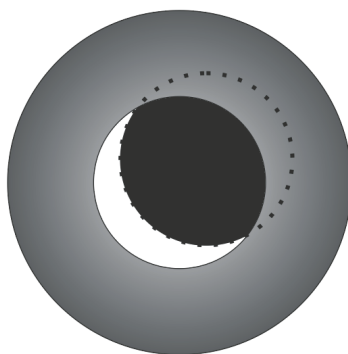


Figure 4.8 Rondelle décentrée

Orientation des fibres de carbone

Les causes précédentes ont été considérées tout au long des essais, mais rien ne garantit qu'elles ont été totalement éliminées. Il est toutefois intéressant de superposer l'orientation des fibres de chacune des surfaces aux figures 4.6 et 4.7. En se référant à l'annexe B et à

une inspection visuelle, on remarque que l'orientation des fibres sur les faces supérieures et inférieures sont de 45 degrés tel que montré en noir à la figure 4.9.

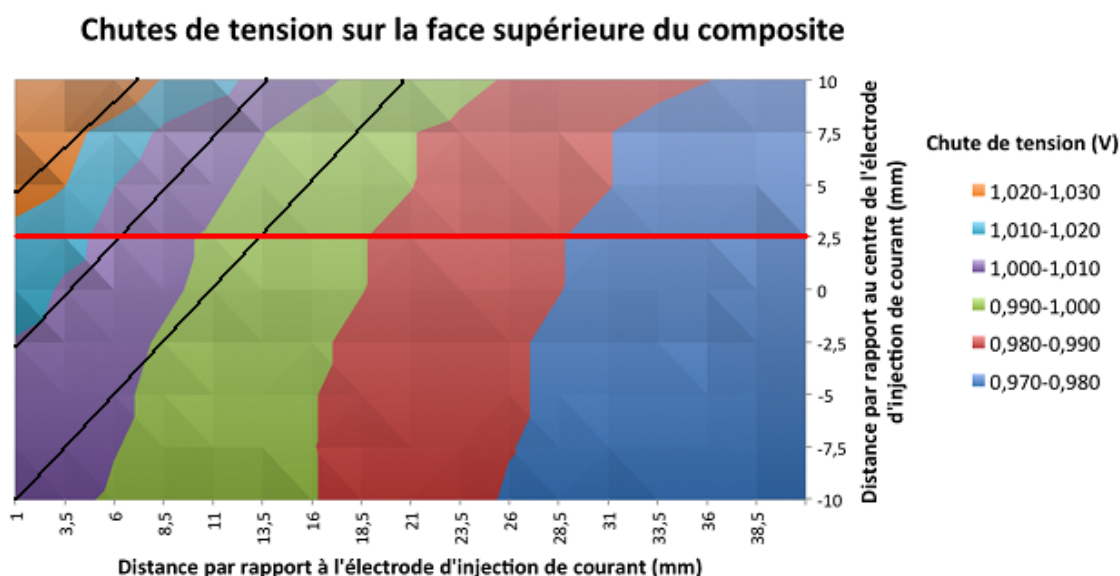


Figure 4.9 Superposition de l'orientation des fibres au profil équipotentiel

D'une certaine façon, il semblerait que les lignes équipotentiels suivent grossièrement l'orientation des fibres de carbone à proximité de l'électrode d'injection de courant et en partie sur le reste de l'échantillon. Ce phénomène rappelle le principe du condensateur et confirmerait que la chute de tension sur la longueur d'une fibre ou d'un groupe de fibres de carbone serait négligeable par rapport à la chute de tension causée par une inclusion de résine. Ceci est vrai autant pour les mesures réalisées sur la face supérieure que celles réalisées sur la face inférieure.

4.3.2 Propagation de la surface supérieure vers la surface inférieure

Bien que les profils équipotentiels tracés précédemment montrent que le courant se propage de la surface supérieure vers la surface inférieure, on note que les valeurs de tension mesurées ne sont pas exactement les mêmes. En fait, les chutes de tension enregistrées sur la face inférieure sont légèrement plus faibles.

En considérant un axe longitudinal donné le long de l'échantillon, par exemple 2,5 mm au-dessus de l'électrode, tel que montré en rouge à la figure 4.9, on peut tracer les chutes de tension pour chacune des faces, tel que montré sur la figure 4.10.

Le point d'intersection entre les deux courbes, qui est le point pour lequel la tension sur chacune des faces est la même, représente approximativement l'endroit de l'échantillon où le

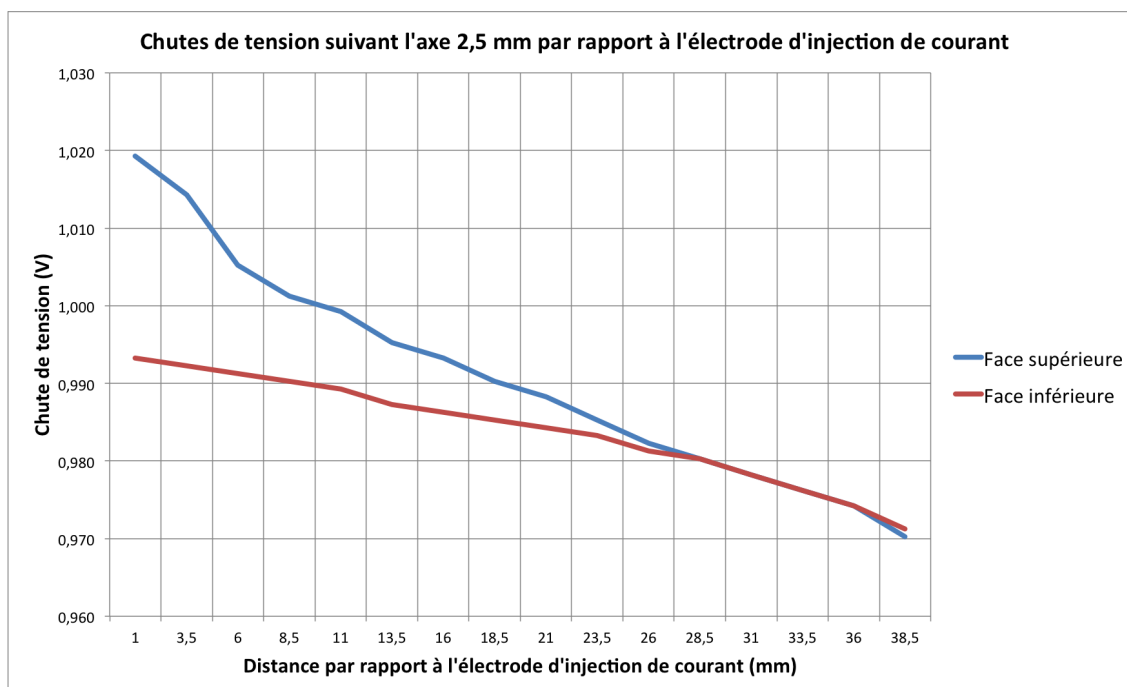


Figure 4.10 Chutes de tension suivant l'axe longitudinal 2,5 mm

courant est uniformément réparti sur toutes les couches du composite. Dans le cas de l'axe de 2,5 mm, on relève une distance de 28,5 mm du plan de l'électrode. En répétant l'exercice pour chacun des axes dont les mesures ont été relevées, on obtient le tableau 4.4

Tableau 4.4 Intersections des courbes de chute de tension pour les faces supérieures et inférieures

Distance par rapport au centre de l'électrode (mm)	Distance du point d'intersection par rapport à l'électrode (mm)
10	Aucune intersection
7,5	38,5
5	Aucune intersection
2,5	28,5
0	36
-2,5	28,5
-5	33,5
-7,5	28,5
-10	31

Bien que les résultats soient très approximatifs, on peut estimer que le courant circule uniformément sur toute l'épaisseur du composite à une distance d'environ 30 mm de l'électrode.

4.3.3 Résistance de contact

Pour estimer la résistance de contact lors des essais réalisés dans ce chapitre, on choisit de considérer, en surface, un axe longitudinal qui présente un profil de tension représentatif de la distribution du courant dans l'échantillon. On choisit donc l'axe médian, soit 0 mm par rapport au centre de l'électrode. La figure 4.11 inclut la tension relevée aux bornes de l'électrode.

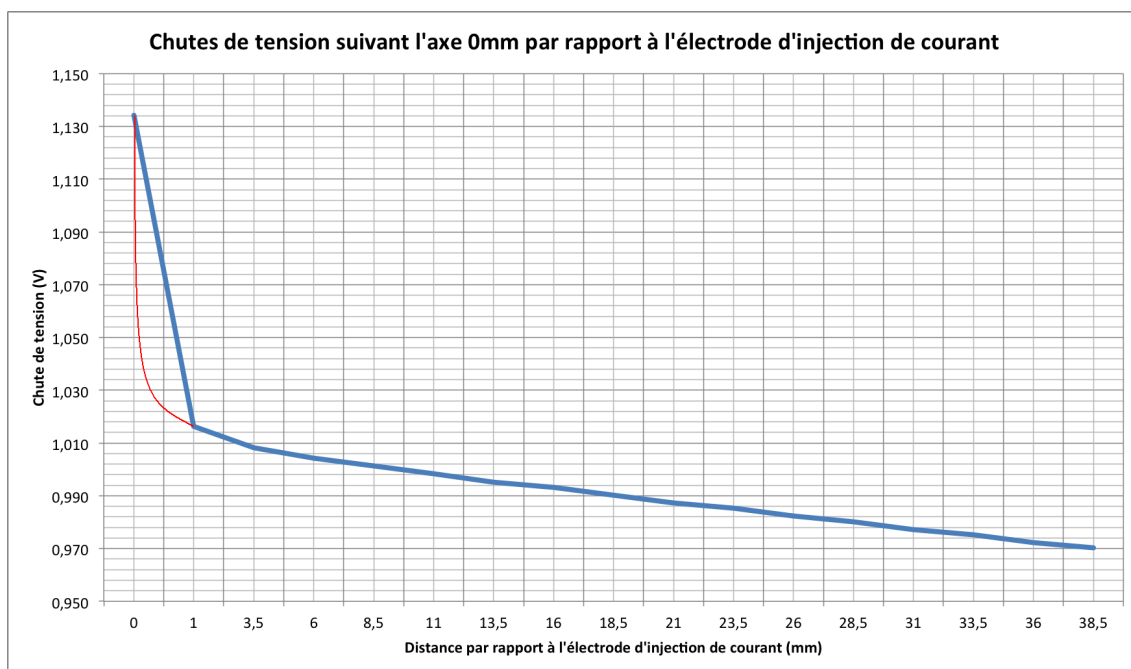


Figure 4.11 Chutes de tension suivant l'axe 0 mm

On remarque que le point de changement de pente de la courbe se trouve à près de 1 mm de l'électrode. Mais attention, comme cette mesure expérimentale est la plus rapprochée qu'il a été possible de réaliser, rien ne garantit que le point de changement de pente ne se trouve pas encore plus près de l'abscisse 0.

On prolonge la courbe expérimentale, en rouge, par un polynôme quadratique suivant la tendance des données recueillies pour illustrer ce qui pourrait décrire plus exactement ce qui se passe à une distance de l'électrode inférieure à 1mm.

En se référant à l'équation 4.1, on se permet tout de même de faire l'estimation conservatrice pour le point d'abscisse 1 mm. Ainsi, d'après l'équation 4.2, la résistance d'interface à une distance de 1mm de l'électrode est calculée comme suit.

$$R_{Cont} = \frac{V_1 - V_2}{I} = \frac{1,134 \text{ V} - 1,016 \text{ V}}{0,5 \text{ A}} = 236 \text{ m}\Omega \quad (4.2)$$

4.3.4 Autres observations

Suite aux expérimentations, il est important de mentionner que la pression de contact entre l'électrode et le composite est un paramètre important à considérer lors d'une éventuelle connexion de retour de courant utilisant le composite. D'ailleurs, ce principe est connu et revient pour plusieurs types de contacts électriques [15]. Dans le cas des essais actuels, les boulons ont simplement été serrés avec une force raisonnable empêchant les électrodes de bouger. Pour fin d'observation, le couple de serrage a ensuite été réduit au minimum et augmenté jusqu'à une valeur d'environ 4 Nm afin de couvrir une plage réaliste. Le tableau 4.5 présente un résumé de ces essais en mettant en valeur la tension relevée à l'électrode pour le même courant de 0,5 A. Pour ce qui est du couple de serrage, seul le plus élevé a pu être mesuré convenablement avec une clé dynamométrique Park Tool TW-2, puisqu'il est très difficile de lire des couples plus petits. On utilise donc des indices dans le tableau. Les mesures de chute de tension ont été effectuées selon l'axe longitudinal médian, c'est-à-dire selon l'axe 0 mm par rapport au centre de l'électrode.

Tableau 4.5 Mesures de tension effectuées pour différents couples de serrage

Couple	Électrode V1 (V)	1 mm de l'électrode V2 (V)	$R_{Cont}(m\Omega)$
-	1,880	1,470	820
essais précédents	1,134	1,016	236
+ (4 Nm)	0,317	0,202	230

Le couple de serrage le plus faible permet tout juste aux cosses de rester en place mais quelques fluctuations de tension sont observables, ce qui en fait un couple beaucoup trop faible en pratique. Pour le couple le plus élevé, on commence tout juste à observer un début de déformation des cosses, ce qui est déconseillé en pratique. Les mesures relevées précédemment ont donc été prises approximativement à mi-chemin entre les deux extrêmes. À partir de ce tableau, on peut aussi observer qu'un couple de serrage suffisamment élevé des électrodes permet à la fois une résistance de contact plus faible, mais aussi une chute de tension plus faible à l'électrode. Ces critères seront donc importants à considérer dans une solution de retour de courant utilisant le composite de carbone.

Une autre vérification intéressante à faire consiste à utiliser les résultats de cet essai pour évaluer la résistivité en utilisant l'équation 3.1 et de comparer avec les résultats du chapitre précédent. Au tableau 4.2, on remarque que la chute de tension entre 2 points consécutifs sur les axes longitudinaux se trouve en moyenne autour de 0,002 V ou 0,003 V. Comme on connaît tous les paramètres $V = 0,002$ V ou 0,003 V, $A = 1,2$ mm x 2,5 mm, $I = 0,5$ A et $L = 2,5$ mm, on peut estimer la résistivité. On obtient une plage d'environ $4,8 \cdot 10^{-5} \Omega m$ à

$7,2 \cdot 10^{-5} \Omega\text{m}$. Cette valeur est raisonnablement proche de ce qui a été obtenu précédemment, soit environ $5,2 \cdot 10^{-5} \Omega\text{m}$ à $5,4 \cdot 10^{-5} \Omega\text{m}$, et confirme donc les résultats dans les deux cas. Il est cependant à noter que la méthodologie et le processus pour la détermination de la résistivité utilisés au chapitre précédent étaient beaucoup mieux contrôlés.

Finalement, puisque ces essais montrent que le courant se distribue dans toutes les couches du composite, les conclusions du chapitre précédent réfutant l'hypothèse de l'utilisation du composite comme médium primaire de retour de courant demeurent valides. C'est-à-dire que si les résultats de ce chapitre avaient montré qu'un courant appliqué en surface circulerait uniquement en surface, les résultats et conclusions du chapitre précédent auraient été limités à ce mode de distribution du courant dans le composite.

CHAPITRE 5

EFFET THERMIQUE D'UN COURANT CONTINU

5.1 Objectif du chapitre

Dans ce chapitre, on cherche à investiguer et quantifier l'échauffement thermique causé par le passage d'un courant continu, plus communément appelé effet Joule, dans un échantillon de composite de carbone tel que celui qui a été utilisé précédemment.

On veut également déterminer des seuils de courant continu, en amplitude et selon la durée d'application, permettant de respecter la limite thermique du composite étudié, qui est de 85 °C.

5.2 Méthodologie

5.2.1 Mesure thermique infrarouge

Pour mesurer l'élévation de température sur la surface du composite, on utilise un thermomètre numérique infrarouge. L'intérêt des mesures par infrarouge, ici, est de pouvoir aisément rechercher les points chauds sur la surface de l'échantillon et d'effectuer la mesure à l'endroit où la température est la plus élevée.

5.2.2 Échantillon

L'échantillon utilisé pour les essais électrothermiques est physiquement le même que celui utilisé pour les essais du chapitre précédent, tel que présenté sur le schéma 4.3.

La seule différence réside dans le fait que les filets des boulons ne sont pas isolés pour ces essais. Le courant continu est donc injecté dans les faces inférieures et supérieures, et diffuse ensuite sur chacune des couches de l'échantillon en composite.

5.2.3 Procédure

La procédure des essais est résumée par le tableau 5.1. Il est à noter que les essais sont réalisés à la température ambiante de 22 °C.

Pendant l'essai, un voltmètre est placé aux bornes de l'échantillon.

Tableau 5.1 Algorithme de l'essai électrothermique

-
-
- Injecter un courant continu dans l'échantillon pendant 1,5 heures (ou jusqu'au moment où la température atteint approximativement le seuil de 85 °C), en débutant avec 0,5 A et en augmentant de 0,5 A à chaque itération.
 - Pour chaque valeur de courant, mesurer périodiquement la température au point de température maximale en notant le temps.
-
-

5.2.4 Montage

Pour cet essai, le montage expérimental comprend une source de courant continu Dazheng PS-305D de 0 à 5 A (0 à 15 V) ainsi qu'un thermomètre numérique infrarouge MTP 1325, tel que montré à la figure 5.1.

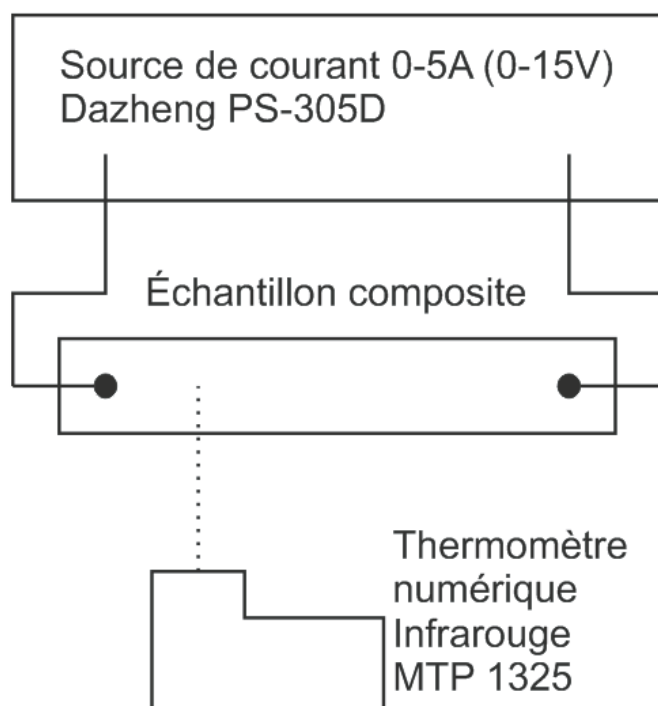


Figure 5.1 Montage expérimental pour les essais électrothermiques

Un multimètre Fluke 8840A est également utilisé pour réaliser une mesure de tension aux bornes de l'échantillon pour chaque essai de courant. Pour réduire le plus possible l'impact des points chauds lors de cet essai, on applique un couple de serrage qui se trouve près de la limite de 4 Nm trouvée au chapitre précédent.

Après quelques manipulations d'essai, il est convenu que la mesure de température est

prise à une distance de 4 mm de l'électrode de retour de courant car ceci correspond au point le plus chaud du montage. Il est probable que ce point chaud de l'échantillon, d'environ 0,5 °C de plus qu'ailleurs, se trouve à l'endroit de plus grande densité de courant à proximité du contact. Il est également possible que la nature hétérogène de l'échantillon impliquant les fibres de carbone et la résine résulte en une légère variation de la résistance du composite à cet endroit. Pour réaliser cette mesure, la tête de lecture du thermomètre est maintenue à 30 mm de la surface du composite. D'après le fabricant, ceci donne un point de mesure sur la surface d'un diamètre donné par l'équation 5.1.

$$D = \frac{30 \text{ mm}}{12} = 2,5 \text{ mm} \quad [\text{mm}] \quad (5.1)$$

Où D est le diamètre du point de mesure de la température (mm²), et 12 est le rapport distance-diamètre, tel que stipulé par le fabricant du MTP 1325.

5.3 Résultats

5.3.1 Élévation de température selon le courant et le temps

Les résultats sont présentés graphiquement aux figures 5.2 et 5.3. Les résultats intermédiaires pour 0,5 A, 1,5 A etc. ont été omis volontairement du graphique afin de ne pas le surcharger, mais ils sont présentés dans le tableau 5.2.

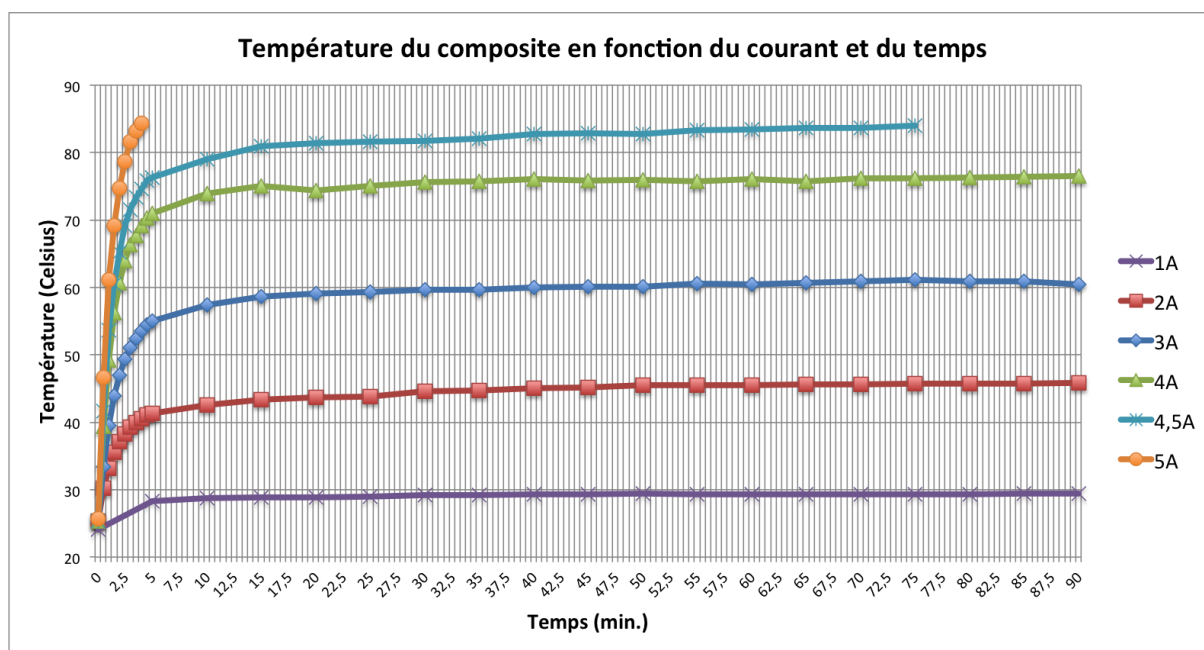


Figure 5.2 Élévation de température du composite 0-90 minutes

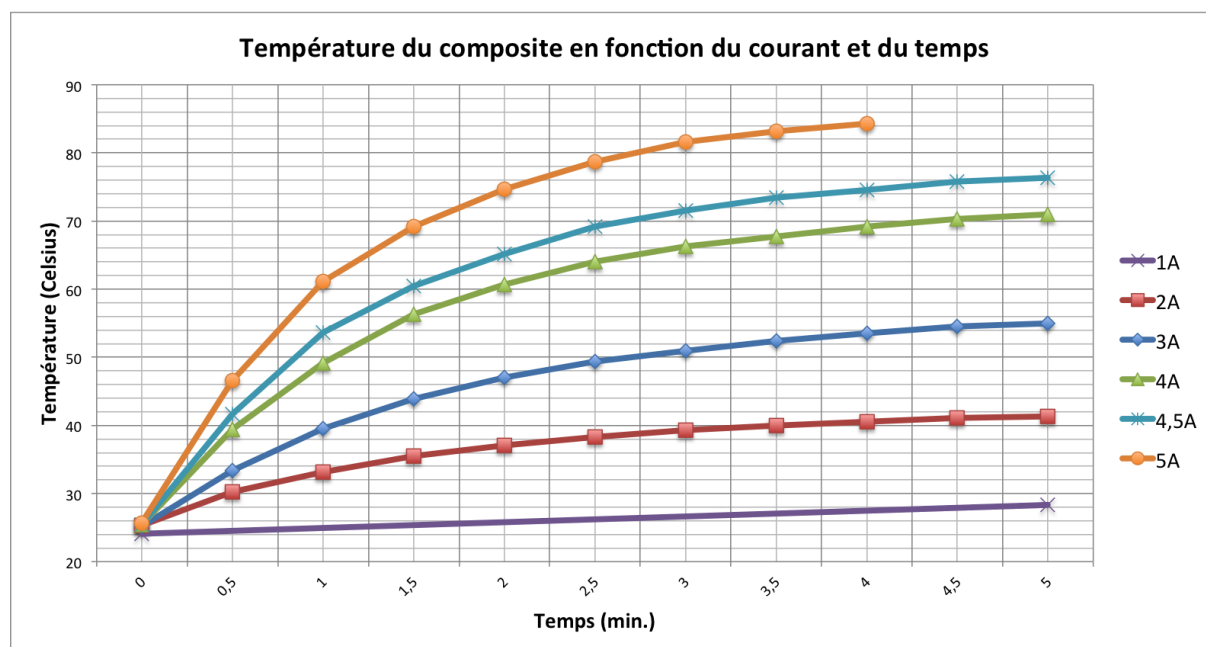


Figure 5.3 Élévation de température du composite 0-5 minutes

Pour les courants compris entre 1 A et 4 A inclusivement, la température du composite atteint son équilibre thermique bien avant la période d'essai de 90 minutes. Pour un courant de 4,5 A, la température passe au-dessus du seuil de 84 °C après un délai de 75 minutes. Le cas du courant de 5 A est le plus sévère testé ici puisque la température atteint le seuil après seulement 4 minutes. Même s'il aurait été intéressant de poursuivre avec des courants plus élevés permettant d'atteindre le seuil en quelques secondes, ce genre de test risquerait d'être destructif et ne changerait rien à la détermination de la charge et du temps nécessaire pour franchir le seuil thermique, qui est une limite opérationnelle.

Le fait de considérer des seuils thermiques de 84 °C lors des essais et non de précisément 85 °C tel que suggéré est simplement une précaution, mais qui permet de garder les résultats tout à fait représentatifs. Cette précaution est prise pour éviter de dépasser accidentellement le seuil thermique, ce qui pourrait produire des dommages irréversibles aux matériaux. Cette précaution est également prise en considération de l'incertitude sur les mesures de température et de courant.

5.3.2 Seuils

Pour ces essais, le scénario testé ayant permis de faire circuler la plus grande amplitude de courant continu tout en respectant la limite thermique de 85 °C est de 4 A. En effet, il est important de comprendre que le seuil thermique ne peut jamais être dépassé puisqu'il s'agit

Tableau 5.2 Température du composite selon le courant et le temps (°C)

Temps (min.)	Courant (A)									
	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
0	23,1	24,1	24,7	25,3	25,6	25,2	25,6	25,4	25,4	25,7
0,5				30,2	31,1	33,4	35,8	39,4	41,6	46,6
1				33,2	35,3	39,5	43,5	49,2	53,6	61,1
1,5				35,5	38,2	43,9	48,5	56,3	60,5	69,2
2				37,1	40,6	47,0	53,3	60,7	65,2	74,7
2,5			31,2	38,3	42,4	49,4	56,0	64,0	69,2	78,7
3				39,3	43,6	51,0	58,0	66,3	71,5	81,6
3,5				40,0	44,7	52,4	59,7	67,7	73,4	83,2
4				40,5	45,7	53,5	60,9	69,2	74,6	84,3
4,5				41,1	46,3	54,5	61,5	70,3	75,8	
5	24,0	28,3	33,0	41,3	46,8	55,0	62,4	71,0	76,3	
10	24,2	28,8	34,1	42,6	49,1	57,4	64,0	73,9	79,0	
15	24,6	28,9	34,3	43,4	50,2	58,6	64,6	75,0	80,9	
20	24,8	28,9	34,3	43,7	51,1	59,1	65,6	74,4	81,4	
25	24,9	29,0	34,5	43,8	51,6	59,3	65,9	75,0	81,6	
30	25,2	29,2	34,7	44,6	51,9	59,7	66,0	75,6	81,7	
35	25,4	29,2	34,7	44,7	52,0	59,7	66,4	75,7	82,1	
40	25,5	29,3	34,8	45,1	52,4	60,0	66,4	76,1	82,7	
45	25,6	29,3	34,9	45,2	52,7	60,1	66,9	75,8	82,9	
50	25,8	29,4	34,9	45,5	52,7	60,1	67,1	76,0	82,7	
55	25,8	29,3	35,1	45,5	52,9	60,6	67,0	75,7	83,3	
60	25,8	29,3	35,3	45,5	53,2	60,5	67,1	76,1	83,4	
65	25,8	29,3	35,3	45,6	53,3	60,7	67,2	75,7	83,7	
70	25,8	29,3	35,2	45,6	53,2	60,9	67,0	76,2	83,7	
75	25,8	29,3	35,2	45,7	53,3	61,1	67,1	76,2	84,0	
80	25,8	29,3	35,2	45,7	53,5	60,9	67,1	76,3		
85	25,8	29,4	35,2	45,7	53,4	60,9	66,8	76,4		
90	25,8	29,4	35,3	45,8	53,5	60,5	67,1	76,5		

d'une contrainte d'exploitation du composite à l'essai.

5.3.3 Puissances

Pour chaque essai de courant, la mesure de tension permet de calculer la puissance moyenne d'après l'équation 5.2 et de construire le tableau comparatif 5.3 qui met également en relation l'élévation de température pour chacun des cas. Comme une élévation de la tension de 20 mV à 150 mV a été observée aux bornes de l'échantillon, la puissance moyenne est calculée à titre indicatif avec la tension moyenne aux bornes de l'échantillon.

$$P = VI \quad [\text{W}] \quad (5.2)$$

Où P , V et I sont respectivement la puissance (W), la chute de tension à l'électrode d'injection de courant (V) et le courant circulant dans l'échantillon (A).

Tableau 5.3 Calcul des puissances pour chaque essai électrothermique

Courant (A)	P (W)	P_c (W)	% de P	$q_c \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right)$	ΔT après 90 min. ou au seuil ($^{\circ}\text{C}$)
0,5	0,132	0,058	43,9	1126	2,7
1	0,531	0,230	43,3	4505	5,3
1,5	1,239	0,518	41,8	10 117	10,6
2	2,548	0,920	36,1	18 022	20,5
2,5	3,646	1,438	39,4	28 159	27,9
3	4,907	2,070	42,2	40 548	35,3
3,5	5,890	2,818	47,8	55 191	41,5
4	7,752	3,680	47,5	72 086	51,1
4,5	8,464	4,658	55,0	91 234	58,6
5	10,893	5,750	52,8	112 635	58,6

La 3e colonne du tableau 5.3 correspond à une estimation expérimentale de la puissance qui serait associée à la résistance de contact de l'électrode d'injection de courant. Pour ce faire, on peut considérer une résistance de contact approximative de 230 m Ω , tel que calculé au chapitre précédent, et utiliser l'équation 5.3.

$$P_c = I^2 R_c \quad [\text{W}] \quad (5.3)$$

Où P_c , I et R_c sont respectivement la puissance dissipée due à la résistance de contact de l'électrode d'injection de courant (W), le courant injecté dans l'échantillon (A) et la résistance de contact de l'électrode (Ω).

La 4e colonne est le pourcentage de la puissance P_c sur la puissance totale P .

La 5e colonne du tableau, en accord avec l'équation 5.4 [55] correspond à la densité de chaleur, ou puissance, au point de contact, c'est-à-dire à l'électrode d'injection du courant.

$$q_c = \frac{I^2 R_c}{A} = \frac{P_c}{A} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right] \quad (5.4)$$

Où q_c , I , R_c et A sont respectivement la densité de puissance ($\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$), le courant injecté dans l'échantillon (A), la résistance de contact de l'électrode (Ω) et l'aire de l'électrode (m^2) respectivement.

La surface de l'électrode en forme de rondelle vient des dimensions et de l'équation 5.5.

$$A = \pi r_2 - \pi r_1 = \pi 0,0045^2 - \pi 0,002^2 = 51,05 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^2] \quad (5.5)$$

Où A , r_2 et r_1 sont respectivement l'aire de la rondelle (m^2), le rayon externe de la rondelle (m^2) et le rayon interne de la rondelle (m^2) respectivement.

À partir du tableau 5.3, il est intéressant de remarquer que la puissance dissipée aux contacts électriques est la principale source de perte de chaleur. C'est d'ailleurs l'observation qui a été réalisée lors des manipulations préliminaires et la recherche des points chauds. Cette observation permet donc d'affirmer que pour la conception d'une solution de retour de courant qui utilise le composite de carbone, le respect ou non de la limite thermique opérationnelle doit absolument se faire à proximité des points d'injection du courant.

Il est tout de même difficile de comparer les résultats avec ceux de la référence principale [55] pour ces travaux puisque les types de composites utilisés sont très différents par leur nombre de couches, leur composition, leur orientation, la dimension des échantillons et le type de contact électrique. L'article en question prouve également la grande différence qu'il peut y avoir entre les résultats obtenus pour une configuration de composite et une autre. De plus, dans cet article, les courants injectés pour les essais sont plus élevés et les études principalement réalisées sur des plages temporelles durant moins de 5 minutes, pendant lesquelles plusieurs scénarios n'atteignent pas de régime stable. Cependant, les conclusions présentées dans les 2 sections ci-dessous suivent définitivement la même direction.

5.3.4 Chute de tension en fonction de la température

Concernant les légères élévations de chute de tension qui ont été observées aux bornes de l'échantillon, il est intéressant de noter que cette observation a également été réalisée et attribuée à une augmentation de la résistance de contact [55] à l'interface entre l'électrode et le composite suivant l'augmentation de température. Cette observation est logique, puisque l'on a montré précédemment que la température ambiante, et donc de l'échantillon, n'a qu'un très faible impact sur la résistance de ce dernier. En fait, la résistance du composite diminue même légèrement lorsqu'il est à une température plus élevée, à courant constant. Ainsi, une augmentation de la chute de tension aux électrodes, à courant constant, ne peut être attribuée qu'à l'augmentation de la résistance de contact.

5.3.5 Autres observations

Le principe de seuil de courant continu pour l'atteinte d'une température donnée dépend bel et bien à la fois du courant appliqué ainsi que du temps d'application de ce courant. Les valeurs numériques obtenues dépendent également d'une multitude de facteurs tels le type

de contact électrique et le couple de serrage de ces contacts, tel que démontré au chapitre précédent.

Comme on peut le voir dans ce chapitre, l'essentiel de l'échauffement est causé par la résistance de contact entre une électrode sous forme de cosse et le composite.

CHAPITRE 6

PARAMÈTRES D'IMPÉDANCE PROPRE ET MUTUELLE

6.1 Objectif du chapitre

La dernière section de ce mémoire rapporte une activité de développement qui a été entreprise au tout début de ce projet de recherche avec pour objectif le calcul des paramètres d'impédance (R , L et C) de n'importe quelle configuration multiconducteurs par la méthode des éléments finis, notamment lorsque le plan de masse consiste en un fuselage en composite.

En fait, un programme MATLAB-COMSOL a été développé en ayant en tête l'analyse de ces paramètres électriques pour différentes configurations de câbles, toujours dans le cadre d'études de solutions de retour de courant. Comme ce sujet n'est pas directement relié à ce qui est traité dans les chapitres précédents et n'a pas été poursuivi depuis approximativement le milieu du projet de maîtrise, ce programme n'est pas entièrement terminé. On juge toutefois que des observations intéressantes ont été réalisées au niveau algorithmique, et ce, principalement pour le calcul des capacités. Il est donc important de les rapporter. Il est à noter que la raison principale pour laquelle ce volet a été placé en seconde priorité était l'absence de données électriques sur les matériaux composites, ce qui justifie la campagne expérimentale présentée dans les chapitres précédents.

L'intérêt de l'obtention des paramètres d'impédance pour une configuration géométrique de câbles et de retour de courant donnée est de permettre ensuite la simulation de différents scénarios électriques de court-circuits, par exemple, par un programme de simulation. En fait, toute la géométrie peut alors être modélisée par les trois matrices d'impédance R , L et C , ainsi que les résistances de contact aux points de connexion avec le composite, le tout intégré dans un simulateur de circuits électriques.

6.2 Méthodologie

6.2.1 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est une méthode de résolution numérique basée sur la discrétisation d'un domaine et la résolution de la forme faible d'équations différentielles. Pour le calcul des impédances d'une géométrie de conducteurs donnée, le recours à cette méthode permet d'éviter la résolution analytique d'équations différentielles aux dérivées partielles. Ceci est d'autant plus important lorsque l'on cherche à étudier une grande variété de configurations

géométriques différentes et lorsque le nombre de conducteurs devient important. Dans de tels cas, les équations analytiques seraient beaucoup trop complexes à résoudre et changeraient au gré des configurations géométriques. On n'aborde pas ici de démonstration mathématique concernant la méthode des éléments finis, on s'intéresse seulement aux aspects programmation et utilisateur.

La modélisation d'une géométrie se fait par l'intermédiaire des fonctions MATLAB contenues dans la librairie de COMSOL Multiphysics version 3.5a. Celle-ci peut être soit implantée directement dans le script MATLAB, ou tracée d'abord dans l'environnement COMSOL pour être ensuite exportée manuellement vers le script. L'utilisateur doit aussi modifier certaines données telles que la permittivité, la conductivité des matériaux et la fréquence à l'étude.

6.2.2 Utilisation du code Matlab

L'intérêt du code MATLAB est de permettre à l'utilisateur de modéliser facilement son problème en remplissant uniquement la première section du fichier `Sim_3_Impedances.m`. En se référant à l'annexe E, l'utilisateur doit passer à travers les étapes résumées ci-dessous.

1. Définir la géométrie par des formes simples circulaires et rectangulaires. Par exemple, la commande `g2=ellip2(0.0025,0.0025,'base','center','pos',[-0.0035,0])` permet de tracer une ellipse de rayons 0,0025 par 0,0025, dont le centre est à la position `[-0,0035,0]`. La commande `g4=rect2(0.02,0.0005,'base','corner','pos',[-0.01,-0.004])` permet de tracer un rectangle de côtés 0,02 par 0,0005, et le coin gauche est à la position `[-0,01, -0,004]`.¹
2. Compléter les variables `USERgeometry`, `USERname` et `USERtags` en respectant la convention indiquée. L'utilisateur peut donner un nom à chaque géométrie.
3. Indiquer les paramètres de conductivité électrique, de permittivité et de perméabilité pour chaque géométrie. La première entrée du vecteur représente toujours le domaine extérieur du problème, typiquement l'air.
4. Indiquer la fréquence fixe pour laquelle on veut calculer les paramètres ou la plage de fréquence suivie du pas de discrétisation pour le calcul de la réponse fréquentielle.

6.2.3 Calcul des paramètres résistifs et inductifs, R et L

Équations

Considérant une géométrie à n conducteurs qui inclut le médium de retour de courant, tel que montré à la figure 6.1, la théorie de base des circuits implique la relation suivante :

1. Le domaine extérieur est défini dans le fichier `Sim_Impedances_Solver` sous le nom `g1`

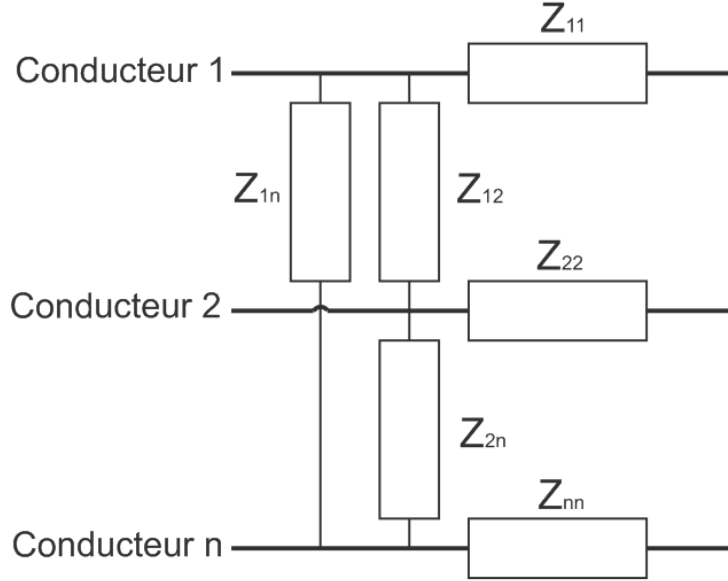


Figure 6.1 Paramètres R et L d'une configuration à n conducteurs

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

La matrice d'impédance Z peut être subdivisée en matrices R et L .

$$Z = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{n1} & L_{n2} & \dots & L_{nn} \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

Cette matrice est symétrique puisque $Z_{1n} = Z_{n1}$. À la figure 6.1, on l'observe en remarquant que la valeur numérique de l'impédance entre deux conducteurs est unique, qu'elle soit considérée dans un sens ou dans l'autre. Ceci est également vrai pour les paramètres capacitifs que l'on verra dans les prochaines sections de ce mémoire.

Imposition des contraintes de courant

Afin d'identifier les valeurs de R et L dans les matrices à partir des simulations par éléments finis, la façon la plus simple de procéder est d'imposer, à tour de rôle, un courant fixe dans chaque conducteur et un courant nul dans les autres. À chaque itération, on obtient

une famille d'équations mettant en jeu les impédances appropriées. Par exemple, l'imposition d'un courant I_2 permet d'obtenir les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_1 = Z_{12}I_2 \\ V_2 = Z_{22}I_2 \\ \vdots \\ V_n = Z_{n2}I_2 \end{cases} \quad (6.3)$$

On choisit d'imposer des courants de 1 A, ce qui permet d'identifier directement Z par la valeur de la tension V calculée par éléments finis. Avec cette approche, il n'y a qu'à résoudre autant de problèmes d'éléments finis qu'il y a de conducteurs. Chaque problème permet de déterminer une colonne complète de valeurs d'impédances dans les matrices R et L .

Après avoir extrait ces résultats, les valeurs de R et L sont simplement obtenues en séparant les termes réels (R) et imaginaires ($X_L = j\omega L$).

$$Z_{ij} = V_i = R_{ij} + j\omega L_{ij} \quad (\text{pour un courant de 1 A}) \quad (6.4)$$

Fonction de la fréquence

En plus de la géométrie, les valeurs d'impédance dépendent aussi de la fréquence des courants électriques ($\omega = 2\pi f$). Pour l'étude actuelle, il est donc intéressant de les calculer pour une plage de fréquences donnée et ainsi de faire ressortir les relations fréquentielles.

6.2.4 Calcul des paramètres capacitifs C

Pour le calcul des composantes capacitives, il existe des équations analytiques, comme pour les inductances d'ailleurs, qui concernent les cas classiques, tels que ceux du câble coaxial, de deux conducteurs rectilignes parallèles et d'un conducteur unique à une certaine distance d'un plan de masse. Dans ces cas, on a respectivement les équations suivantes [60] :

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad \left[\frac{\text{F}}{\text{m}}\right] \quad (6.5)$$

$$C = \frac{\pi\epsilon}{\cosh^{-1}\left[\frac{D}{2a}\right]} \quad \left[\frac{\text{F}}{\text{m}}\right] \quad (6.6)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\cosh^{-1}\left[\frac{h}{a}\right]} \quad \left[\frac{\text{F}}{\text{m}}\right] \quad (6.7)$$

Les équations de cette forme se compliquent rapidement pour les cas multiconducteurs. Une alternative pour déterminer la valeur d'une capacité dans le cas d'une géométrie non

conventionnelle est d'utiliser l'équation de l'énergie :

$$W = \frac{1}{2}CV \quad [\text{J}] \quad (6.8)$$

On peut le faire assez aisément dans l'environnement COMSOL Multiphysics. Le principe est très simple pour le cas de 2 conducteurs, comme par exemple pour le cas d'un câble coaxial. Il consiste par l'imposition d'une tension fixe sur l'un des conducteurs tandis que l'autre est à la masse. La résolution se fait ensuite dans l'environnement COMSOL Multiphysics. Cette méthode se complique dans les cas multiconducteurs. La résolution, telle que décrite par Lorenzen [43], implique la construction d'un système linéaire basé sur cette équation de l'énergie.

Problème

Pour éviter toute confusion ou abus de langage, il est utile de rappeler que le nombre de conducteurs décrit dans chacun des titres ci-dessous inclut le médium de retour de courant, tout comme pour la section précédente. Par exemple, un câble coaxial est considéré ici sous la rubrique à 2 conducteurs, tout comme celui d'un câble au-dessus d'un plan de masse. Le cas de 3 câbles à proximité d'une partie structurale d'un avion en composite, agissant comme médium de retour de courant, serait considéré sous la rubrique à 4 conducteurs. La figure 6.2 illustre la cas général à n conducteurs.

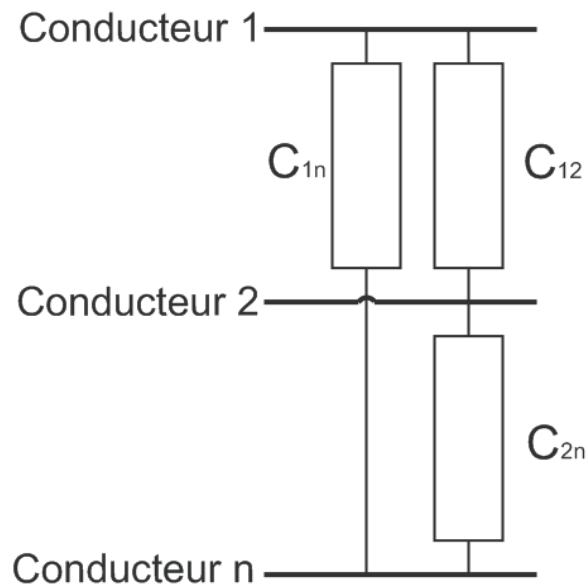


Figure 6.2 Paramètres C d'une configuration à n conducteurs

2 Conducteurs

Pour ce cas, il existe une seule inconnue, soit C_{12} qui se trouve entre les conducteurs 1 et 2. Évidemment, C_{21} se trouve à être la même composante. On impose une tension fixe sur la frontière du premier conducteur (V_1) et on obtient l'équation de l'énergie suivante :

$$W_1 = \frac{1}{2}C_{12}V_1^2 \quad (6.9)$$

Après la résolution avec COMSOL pour W_1 , on obtient directement C_{12} .

3 conducteurs

De façon similaire, on a ici 3 inconnues : C_{12} , C_{13} , C_{23} . L'imposition d'une tension sur un conducteur peut maintenant impliquer des combinaisons en parallèle des capacitances, ce qui implique leur addition algébrique. En imposant à tour de rôle les tensions V_1 , V_2 et V_3 , tout en maintenant les autres potentiels à zéro, on obtient le système d'équation suivant :

$$W_1 = \frac{1}{2}(C_{12} + C_{13})V_1^2 \quad (6.10)$$

$$W_2 = \frac{1}{2}(C_{12} + C_{23})V_2^2 \quad (6.11)$$

$$W_3 = \frac{1}{2}(C_{13} + C_{23})V_3^2 \quad (6.12)$$

Ce système d'équations peut être résolu car il contient 3 inconnues, 3 équations.

4 conducteurs

Pour 4 conducteurs, on a 6 inconnues : C_{12} , C_{13} , C_{14} , C_{23} , C_{24} , C_{34} et on obtient le système suivant lorsque l'on précède tel que précédemment :

$$W_1 = \frac{1}{2}(C_{12} + C_{13} + C_{14})V_1^2 \quad (6.13)$$

$$W_2 = \frac{1}{2}(C_{12} + C_{23} + C_{24})V_2^2 \quad (6.14)$$

$$W_3 = \frac{1}{2}(C_{13} + C_{23} + C_{34})V_3^2 \quad (6.15)$$

$$W_4 = \frac{1}{2}(C_{14} + C_{24} + C_{34})V_4^2 \quad (6.16)$$

Avec 4 équations et 6 inconnues, on ne peut plus résoudre le problème.

6.2.5 Solution pour le calcul des paramètres capacitifs C

La solution suggérée par Lorenzen [43] est d'imposer également des combinaisons de tension supplémentaires pour les conducteurs donnés. Par exemple, on pourrait imposer 2 combinaisons de tension supplémentaires pour obtenir les 2 équations manquantes. Par exemple, pour le cas à 4 conducteurs, on pourrait également fixer les tensions V_1 et V_2 tout en gardant les autres à zéro, et on pourrait ensuite fixer V_1 et V_3 tout en gardant les autres à zéro. Dans l'exemple à 4 conducteurs, en notant par exemple $V_{1,2}$ comme l'imposition de tension sur les conducteurs 1 et 2, les 2 équations supplémentaires prendraient la forme suivante :

$$W_{1,2} = \frac{1}{2}(C_{13} + C_{14} + C_{23} + C_{24})V_{1,2}^2 \quad (6.17)$$

$$W_{1,3} = \frac{1}{2}(C_{12} + C_{14} + C_{23} + C_{34})V_{1,3}^2 \quad (6.18)$$

Avec 6 équations ($W_1, W_2, W_3, W_4, W_{1,2}, W_{1,3}$), ainsi que 6 inconnues ($C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{23}, C_{24}, C_{34}$), on peut maintenant résoudre le système. Ces 6 équations d'énergie peuvent être retranscrites sous la forme matricielle présentée ci-dessous, dans laquelle les tensions ($V_1, V_2, V_3, V_4, V_{1,2}, V_{1,3}$) sont remplacées par une tension arbitraire V , qui peut avoir la même valeur d'un essai à l'autre. En pratique, cette tension pourrait être fixée à 1 V.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{12} \\ C_{13} \\ C_{14} \\ C_{23} \\ C_{24} \\ C_{34} \end{bmatrix} = \frac{2}{V^2} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ W_4 \\ W_{1,2} \\ W_{1,3} \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

On voit que ce système d'équations prend la forme générale $Ax = B$. Chaque ligne du système est liée à une configuration d'imposition de tension. La matrice A est exclusivement sous forme binaire et elle indique la combinaison des capacitances pour chaque configuration de tension. Le vecteur colonne x contient les inconnues C_{ij} . Le vecteur colonne B contient les valeurs de W_i calculés par COMSOL, chaque ligne impliquant une itération de calcul par éléments finis. Pour le cas de 4 conducteurs décrit précédemment, 6 itérations sont donc nécessaires pour remplir le vecteur colonne B .

6.2.6 Approche Générique

Dans son article, Lorenzen [43] présente la méthode en choisissant des combinaisons de tensions arbitraires. Pour une étude impliquant une grande multitude de configurations de conducteurs, il est utile de développer une méthode plus générique.

Nombre d'inconnues

Tout d'abord, on peut déterminer le nombre de capacités C inconnues d'après le nombre de conducteurs d'une configuration géométrique. Cette information est primordiale pour toute autre manipulation. Le tableau 6.1 permet de visualiser la loi.

Tableau 6.1 Association du nombre de conducteurs aux nombres de capacités C inconnues

Nombre de conducteurs	Nombre d'inconnues
2	1
3	3
4	6
5	10
\vdots	\vdots

$$c = \frac{n(n-1)}{2} \quad \left\{ \begin{array}{l} c : \text{Nombre d'inconnues} \\ n : \text{Nombre de conducteurs} \end{array} \right. \quad (6.20)$$

Équations supplémentaires

Pour un cas donné, on doit aussi connaître le nombre d'équations (combinaisons de tension) supplémentaires requises pour compléter le système d'équations. Il s'agit simplement de la différence entre le nombre de conducteurs et le nombre d'inconnues.

$$s = c - n = \frac{n(n-3)}{2} \quad \left\{ \begin{array}{l} s : \text{Nombre d'équations supplémentaires} \\ c : \text{Nombre d'inconnues} \\ n : \text{Nombre de conducteurs} \end{array} \right. \quad (6.21)$$

Lorsque la valeur s est positive, on doit imposer de nouvelles combinaisons de tensions, d'un nombre égal à la valeur de s .

Combinaisons supplémentaires

On doit comprendre que pour un cas donné, il existe des combinaisons de 1 tensions tel que V_1 et V_2 , mais il peut aussi exister des combinaisons de 2, 3, 4... tensions. Pour le développement d'un algorithme générique, la situation peut devenir complexe, du moins a priori. Par exemple pour 5 conducteurs, le tableau 6.2 montre toutes les combinaisons d'imposition de tension possibles.

Tableau 6.2 Combinaisons de tension possibles pour 5 conducteurs

1 tension	2 tensions	3 tensions	4 tensions
V_1	$V_{1,2}$	$V_{1,2,3}$	$V_{1,2,3,4}$
V_2	$V_{1,3}$	$V_{1,2,4}$	$V_{1,2,3,5}$
V_3	$V_{1,4}$	$V_{1,2,5}$	$V_{1,2,4,5}$
V_4	$V_{1,5}$	$V_{1,3,4}$	$V_{1,3,4,5}$
V_5	$V_{2,3}$	$V_{1,3,5}$	$V_{2,3,4,5}$
	$V_{2,4}$	$V_{1,4,5}$	
	$V_{2,5}$	$V_{2,3,4}$	
	$V_{3,4}$	$V_{2,3,5}$	
	$V_{3,5}$	$V_{2,4,5}$	
	$V_{4,5}$	$V_{3,4,5}$	

Pour développer une méthode générique, on se demande alors jusqu'où l'on doit se rendre dans les combinaisons. Pour un cas contenant beaucoup de conducteurs, comment devons-nous gérer ce nombre de combinaisons ?

On fait la preuve que dans tous les cas, seulement 2 tensions au maximum sont nécessaires pour les combinaisons supplémentaires requises. Il suffit d'observer que pour un nombre de conducteurs donné n , le nombre de combinaisons de 2 tensions disponibles suit la même règle que le nombre d'inconnues c . Le tableau 6.3 montre cette relation.

Tableau 6.3 Combinaisons de 2 tensions possibles pour n conducteurs

Conducteurs (n)	Inconnues (c)	Équ. supp. (s)	Combinaisons 2 tensions disponibles
2	1	-1	0
3	3	0	3
4	6	2	6
5	10	5	10
6	15	9	15
7	21	14	21
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
n	$\frac{n(n-1)}{2}$	$\frac{n(n-3)}{2}$	$\frac{n(n-1)}{2}$ pour $n \geq 3$

En faisant le rapport du nombre d'équations supplémentaires requises s sur le nombre de combinaisons de 2 tensions disponibles, on obtient un rapport qui tend vers 1 lorsque n tend vers l'infini, tel que montré ci-dessous :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{n(n-3)}{2}}{\frac{n(n-1)}{2}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n-3}{n-1} = 1 \quad (\text{R\`egle de L'Hospital}) \quad (6.22)$$

Comme ce rapport ne dépasse jamais 1, on prouve ainsi que l'on peut se contenter simplement des combinaisons de 1 et 2 tensions pour résoudre le problème.

Observation de la matrice A

En revenant sur le système linéaire de l'équation 6.19, on peut envisager que le fait de générer le vecteur d'inconnues x de façon structurée, et ce, peu importe le nombre de conducteurs, devrait se répercuter sur le système linéaire par une structure prévisible. En effet, une bonne observation permet de déceler des schémas périodiques dans la matrice binaire A . Voyons cette matrice pour différents cas.

2 conducteurs

$$\begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix} \quad (6.23)$$

3 conducteurs

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.24)$$

4 conducteurs

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.25)$$

5 conducteurs

$$\begin{bmatrix}
 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\
 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\
 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0
 \end{bmatrix} \quad (6.26)$$

Pour chaque cas de 4 conducteurs et plus, la matrice binaire A peut être divisée en sous-matrices qui présentent toujours la même forme. Dans la matrice A du système à n conducteurs ($n \geq 4$) :

1. La matrice $A(1 \text{ à } n-1, 1 \text{ à } n-1)$ du système à $n-1$ conducteurs apparaît à la position (2 à n , n à c).
2. La matrice immédiatement à gauche de la précédente est une diagonale de 1 de dimensions ($n-1 : n-1$).
3. La première ligne débute avec $n-1$ fois la valeur 1, suivie de 0.
4. Les lignes $n+1$ à c sont chacune le résultat d'un OU EXCLUSIF entre les 2 lignes correspondant aux tensions en jeu.

Illustration du concept

Pour bien illustrer ces observations, prenons en exemple le cas de 4 conducteurs. L'exercice aurait aussi pu être fait avec d'autres cas puisque la règle est générale. Du point de vue programmation, on peut comprendre que la matrice A du système à 3 conducteurs est la matrice générique de départ. Cette dernière doit être construite dès le début pour tous les cas, à l'exception du cas à 2 conducteurs.

Étape 1

La matrice $A(1 \text{ à } 3, 1 \text{ à } 3)$ du cas à 3 conducteurs ;

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.27)$$

apparaît dans la matrice A du système à 4 conducteurs à la position (2 à 4, 4 à 6) ;

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ 0 & 1 & 0 & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ 0 & 0 & 1 & \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.28)$$

Étape 2

La matrice à gauche de cette dernière est une matrice diagonale de dimension 3x3 ;

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 1 & 1 & 0 \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} & 1 & 0 & 1 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.29)$$

Étape 3

La première ligne du cas à 4 conducteurs débute avec 3 fois la valeur 1, le reste de la ligne étant 0 ;

$$\begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.30)$$

Étape 4

Les lignes 5 à 6 de la matrice A pour le cas à 4 conducteurs correspondent à des opérations OU EXCLUSIVES entre les lignes correspondantes aux tensions en jeu. La ligne 5, correspondant à $V_{1,2}$, est le résultat de ;

$$\begin{cases} V_1 \\ \text{OU EXCLUSIF} \\ V_2 \end{cases} = \begin{cases} \text{Ligne 1} \\ \text{OU EXCLUSIF} \\ \text{Ligne 2} \end{cases} = \begin{cases} 111000 \\ \text{OU EXCLUSIF} = 011110 \\ 100110 \end{cases}$$

Et donc ;

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.31)$$

Il en est de même avec la ligne 6, correspondant à $V_{1,3}$;

$$\begin{cases} V_1 \\ \text{OU EXCLUSIF} \\ V_3 \end{cases} = \begin{cases} \text{Ligne 1} \\ \text{OU EXCLUSIF} \\ \text{Ligne 3} \end{cases} = \begin{cases} 111000 \\ \text{OU EXCLUSIF} = 101101 \\ 010101 \end{cases}$$

Et donc ;

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (6.32)$$

6.2.7 Algorithme

Finalement, la méthodologie peut être exprimée sous la forme d'un algorithme générique. Cet algorithme est destiné à être implémenté sous forme de script MATLAB. Ce script

traite localement les opérations de construction et de résolution du système linéaire, tandis que l'environnement COMSOL Multiphysics agit comme outil de calcul pour l'obtention des variables d'énergie W_i . L'algorithme du tableau 6.4 a été écrit sous forme de code informatique et ce dernier est montré en annexe F.

Tableau 6.4 Algorithme de calcul des capacités C

-
-
- On détermine le nombre de conducteurs. À partir d'une géométrie tracée dans l'environnement COMSOL Multiphysics, on peut déterminer automatiquement le nombre de conducteurs d'après le nombre de géométries implantées.
 - On construit la partie supérieure du système en se basant sur les observations présentées précédemment.
 - On construit la matrice des combinaisons de tensions à appliquer. Cette matrice est un outil qui permet un suivi structuré des combinaisons de tension à appliquer dans COMSOL.
 - On construit le bas du système. La partie inférieure du système linéaire est un ensemble de combinaisons OU EXCLUSIVES.
 - À tour de rôle, on applique les tensions aux conducteurs indiqués par la matrice des combinaisons, on résout sur COMSOL Multiphysics, on calcule W_i et on enregistre le vecteur B du système linéaire $Ax = B$.
 - On résout le système linéaire. Le vecteur colonne obtenu x contient toutes les valeurs de $C_{i,j}$.
-
-

6.3 Résultats

Comme il reste encore bien du travail de développement et de dépannage à réaliser en date de la rédaction de ce mémoire et ce principalement pour le calcul des capacités, on présente un essai de validation très simple qui permet de calculer les paramètres R et L tout en utilisant des équations analytiques. En plus du script alternatif pour les capacités tel que décrit plus haut, une première tentative de généralisation d'un code COMSOL sous le nom de fichier Sim_3_Impedances_Solver_C2.m est également inclus à l'annexe E comme référence à d'éventuels travaux futurs dans le domaine, mais le développement et la validation de ce code ne sont pas terminés.

6.3.1 Paire de 2 conducteurs

Pour ce cas, l'impédance propre de la configuration est donnée par l'équation 6.33 [61].

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{D-r}{r} \quad [\text{H}] \quad (6.33)$$

Où L , μ_0 , D et r sont respectivement l'inductance du conducteur (H), la perméabilité du vide ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$), la distance entre les conducteurs (m) et le rayon des conducteurs (m).

Pour une paire de 2 conducteurs de cuivre de rayon 2,5 mm en parallèle d'une longueur de 1 m et distancés de 20 mm, on calcule théoriquement $L = 7,78 \cdot 10^{-7} \text{H}$. Les figures 6.3 et 6.4 confirment également les résultats théoriques.

Pour obtenir l'inductance propre à partir de la matrice L donnée par le programme d'un cas à 2 conducteurs parallèles, on doit calculer $L = 2L_{11} - 2L_{12}$. On obtient $7,9 \cdot 10^{-7} \text{H}$. Il est à noter que la précision de cette valeur varie selon les dimensions du domaine extérieur et la finesse du maillage de la méthode par éléments finis. Ainsi, un grand domaine extérieur avec un maillage très fin permet d'améliorer la précision du résultat. Par la validation de ce genre de scénario simple, le calcul de R et L est fonctionnel. Cependant, le calcul des paramètres capacitifs nécessite encore du temps de développement et de débogage. Il est donc recommandé que les travaux subséquents suivent à partir de cet état d'avancement.

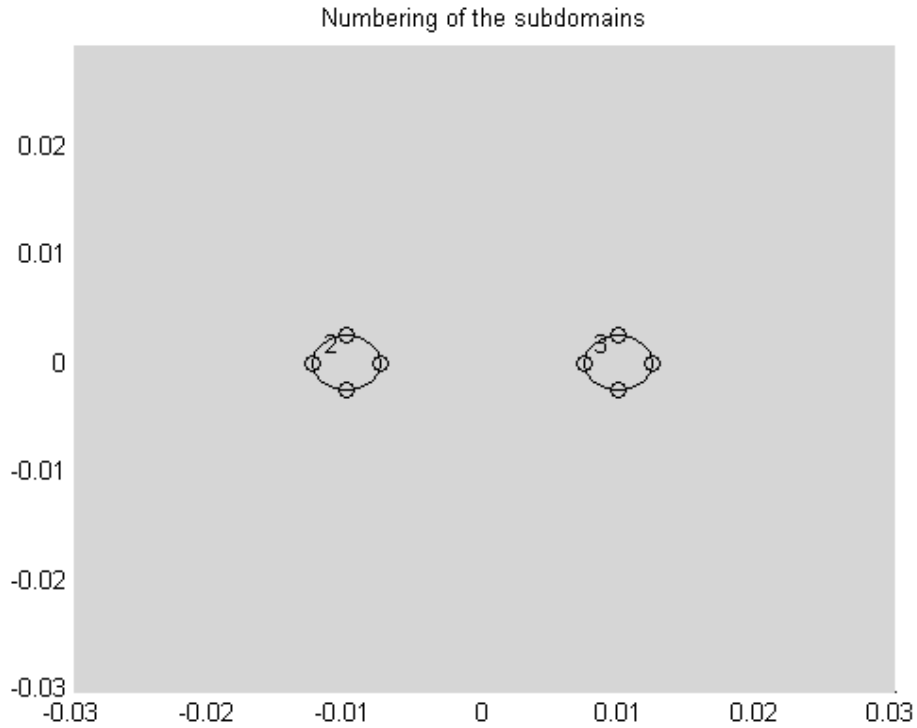


Figure 6.3 Figure pour 2 conducteurs parallèles

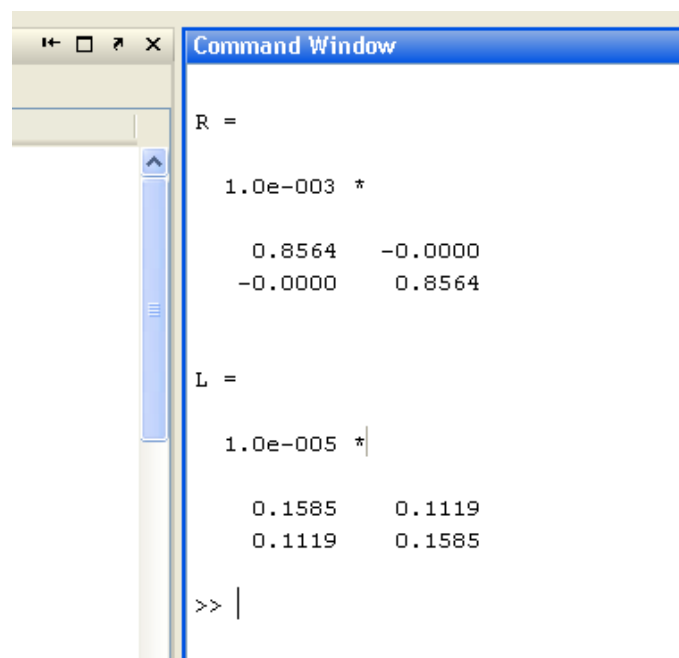


Figure 6.4 Résultats pour 2 conducteurs parallèles à 400Hz

CHAPITRE 7

CONCLUSION

7.1 Synthèse des travaux

Ces travaux ont permis d'investiguer certaines propriétés électriques et thermiques des matériaux en composite de carbone tel que suggéré par Bombardier Aéronautique. Ces études sont d'une grande importance dans le cadre de la recherche de solutions de retour de courant pour les avions au fuselage en matériaux composites. En effet, une meilleure compréhension des propriétés électriques et thermiques des matériaux composites devrait permettre de répondre à plusieurs interrogations agissant comme obstacles à l'optimisation de solutions de retour de courant. Les essais ont été réalisés en considérant des courants continus seulement.

Pour la mesure de la résistivité électrique du composite de carbone, il s'est avéré que la température ambiante n'a qu'une faible influence, du moins dans la plage considérée lors des travaux. On peut donc aisément avancer une valeur de résistivité d'approximativement $5,2 \cdot 10^{-5} \Omega m$, ce qui est environ 1000 fois plus élevé que pour les alliages d'aluminium utilisés en aéronautique. Les essais n'ont pas montré d'anisotropie significative pour l'échantillon considéré, mais il est suspecté que l'orientation des fibres de la couche supérieure, étant à 45 degrés, avait un impact complémentaire pour les deux échantillons. C'est-à-dire que si les fibres sont orientées à 45 degrés pour l'un des échantillons, l'autre échantillon qui a été coupé à un angle relatif de 90 degrés présente des fibres orientées à -45 degrés sur la couche supérieure. Lors de ces essais, il a été observé que la résistivité mesurée avait tendance à diminuer avec une augmentation d'amplitude du courant continu. En se basant sur la recherche littéraire, il semblerait que ce phénomène pourrait être dû à la multiplication de points de contacts locaux entre l'électrode et la surface du composite sous l'effet du courant et de la température, ou plus probablement des effets d'échauffement local des fibres de carbone.

Les mesures de résistivité électrique ont également servi à estimer la résistance et la chute de tension qui seraient causées le long de la partie laminée d'un fuselage en composite de carbone dans l'éventualité où ce dernier n'aurait aucune restriction thermique quant au passage d'un courant continu. Une résistance d'environ $78 m\Omega$ pour 29 V en comparaison de $0,08 m\Omega$ et 0,03 V pour l'aluminium confirme l'hypothèse comme quoi ce composite de carbone ne peut pas servir, tel quel, de médium primaire de retour de courant continu.

On recommande donc d'éliminer toute solution de retour de courant qui isolerait le com-

posite des autres structures métalliques de l'avion.

En investiguant la distribution du courant continu en surface et sur l'épaisseur du composite, nous avons tout d'abord pu estimer la distance à partir de l'électrode nécessaire pour que la chute de tension soit la même sur la face supérieure et la face inférieure, et de prouver que la couche supérieure du composite est électriquement reliée à la couche inférieure par l'intermédiaire des couches intermédiaires. Ce constat confirme l'hypothèse du chapitre précédent. Il a également été observé que les fibres de carbone semblent suivre les lignes équipotentiels à proximité de l'électrode, ce qui prouve que la résine présente une résistance électrique favorisant le courant à circuler dans la direction des fibres de carbone. Une méthode simple a permis de calculer une résistance d'interface d'environ $236\text{ m}\Omega$ entre l'électrode d'injection de courant et la surface du composite. Il s'est avéré que cette valeur dépend du couple de serrage, et comme il a été vu précédemment, du courant impliqué.

Pour la connexion électrique à un panneau de composite, on recommande de porter une attention particulière à la préparation de la surface et au couple de serrage.

Les essais electrothermiques ont permis de montrer que la capacité du composite de carbone à supporter le passage d'un courant continu dépend à la fois de l'amplitude du courant et de la durée d'application. Un seuil maximal de courant continu de 4 A a été relevé pour l'échantillon en question. Il s'agit du courant maximal que l'échantillon peut supporter sans dépasser la limite opérationnelle de 85 °C. Il a également été montré que la plus grande partie de la puissance dissipée se fait à proximité des contacts électriques. De plus, il semblerait que la résistance de contact augmente suivant l'élévation en température.

La problématique du calcul des paramètres d'impédance d'une configuration multiconducteur donnée a été débütée par l'écriture d'un script MATLAB-COMSOL générique. Ce script nécessite encore des efforts de développement et de validation, spécialement pour le calcul des paramètres capacitifs. Le calcul des paramètres R et L a cependant été validé par un scénario simple et vérifiable analytiquement. Suite à quelques observations avec le support de la littérature, un algorithme a été décrit afin de faciliter le calcul des capacités tout en utilisant l'environnement COMSOL, mais il reste encore à intégrer son fonctionnement au script principal.

7.2 Projets futurs

La recherche concernant des solutions de retour de courant pour les avions au fuselage en matériaux composites nécessite encore bien d'autres initiatives, le projet actuel étant une première exploration de plusieurs concepts.

Tout d'abord, pour tout paramètre mesuré, l'investigation comparative entre différentes

recettes de composite de carbone serait nécessaire puisqu'il a été observé en parallèle avec la littérature que ceci a définitivement un impact sur les propriétés mesurées.

Pour la résistance de contact, celle-ci dépend entièrement du type d'électrode utilisé, de la préparation de la surface du composite ainsi que du couple de serrage du boulon de l'électrode. Une avenue intéressante pour les travaux futurs serait de réaliser une étude comparative plus étendue entre toutes les solutions imaginables de connexion électrique au composite de carbone, en passant même par les rivets. Au delà de connexions électriques usuelles, un autre projet pourrait être l'investigation des résistances électriques de contact entre panneaux de composite et d'aluminium. Ce genre d'étude pourrait comprendre également un volet plus étendu de l'effet du couple de serrage tel qu'il a été brièvement exploré dans le cadre de ce projet, puisque l'impact observé s'est avéré non négligeable.

Il serait également intéressant de joindre le type d'étude décrit précédemment à de nouveaux essais visant à mieux comprendre la distribution du courant dans le composite par l'intermédiaire des profils équipotentiels. Ces études viseraient principalement à mieux quantifier expérimentalement l'hypothèse suggérant que l'orientation des fibres de carbone offre un chemin préférentiel, soit de moindre résistance, pour la circulation du courant continu. L'intégration d'essais à fort courant pourrait également être d'intérêt.

L'aspect électrothermique des matériaux composites nécessite bien d'autres travaux. L'utilisation d'une caméra infrarouge lors du passage du courant serait certainement une avenue intéressante à considérer pour mieux investiguer la propagation thermique dans les matériaux. La modélisation et la simulation thermique 3D, dans un environnement COMSOL par exemple, est également un sujet très pertinent. En se référant à certains travaux récents [55], l'approche utilisée devrait permettre la modélisation de chaque couche de composite en déterminant leurs propriétés par la proportion volumique de fibres de carbone et de résine. De telles simulations nécessitent cependant de connaître les paramètres électriques et thermiques de chacune des couches, suivant chaque direction.

L'utilisation d'un script pour le calcul des paramètres d'impédance par éléments finis est un requis pour l'analyse de couplage des configurations de câbles et d'éventuelles simulations de scénarios électriques comme ceux des court-circuits. Le travail qui a été commencé dans le cadre du projet actuel mérite donc d'être poursuivi, du moins au sein du département de génie électrique. Suite au développement et la validation du code pour le calcul des capacités, il sera ensuite possible de réaliser des projets de simulation et d'inclure des géométries de câbles dédiées au retour de courant dans différents modèles.

Les quatre axes de ce projet de recherche ont eu un caractère plutôt exploratoire en abordant plusieurs questions de compréhension relativement au comportement des matériaux composites. L'élaboration de projets de recherche subséquents sur le sujet gagnerait donc

énormément à porter toute l'attention sur seulement un ou deux volets par projet et de mettre l'accent, par exemple, sur la diversification des matériaux utilisés.

RÉFÉRENCES

- [1] A. Asundi and A. Y. N. Choi. Fiber metal laminates : an advanced material for future aircraft. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 63 :pp. 384–394, 1997.
- [2] G. Wu and J.-M. Yang. The mechanical behavior of glare laminates for aircraft structures. *JOM*, vol. 57 :pp. 72–79, jan 2005.
- [3] H. W. Ott. *Electromagnetic Compatibility Engineering*. Wiley, 2009.
- [4] M. Tooley and D. Wyatt. *Aircraft Electrical and Electronic Systems : Principles, operation and maintenance*. Butterworth-Heinemann, 2009.
- [5] A. K. Noor, S. L. Venneri, D. B. Paul, and M. A. Hopkins. Structures technology for future aerospace systems. *Computers & Structures*, vol. 74 :pp. 507–519, 2000.
- [6] A. Beukers, M. J. L. Van Tooren, and T. De Jong. Multi-disciplinary design philosophy for aircraft fuselages. part i. *Applied Composite Materials*, vol. 12 :pp. 3–11, 2005.
- [7] Y. Lin, L. Ye, S. Zhongqing, and M. Guang. Functionalized composite structures for new generation airframes : a review. *Composites Science and Technology*, 65 :1436–1446, 2005.
- [8] A. Baker, S. Dutton, and D. Kelly. *Composite Materials for Aircraft Structures (2nd edition)*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2004.
- [9] Mona Cherkaoui. Current return network (crn) preliminary definition for a composite fuselage aircraft. Technical Report MAE-000-124, Bombardier Aerospace - Core Engineering, 2009.
- [10] M. G. Alexander. Anomalous temperature dependence of the electrical conductivity of carbon-poly(methyl methacrylate) composites. *Materials Research Bulletin*, vol. 34(4) :pp. 603–611, 1999.
- [11] NOAA, NASA, and USAF. *U.S. Standard Atmosphere 1976*. U.S. Government Printing Office, 1976.
- [12] R. A. Serway and J. W. Jewett. *Principles of Physics (2nd edition)*. Saunders College Publishing, 1997.
- [13] A. Boschetti de Fierro, R. Pardey, V. Savino, and A. J. Muller. Piezoresistive behavior of epoxy matrix-carbon fiber composites with different reinforcement arrangements. *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 111 :pp. 2851–2858, 2009.

- [14] E. Sevkat, L. Jackie, B. Liaw, and F. Delale. A statistical model of electrical resistance of carbon fiber reinforced composites under tensile loading. *Composites Science and Technology*, vol. 68 :pp. 2214–2219, 2008.
- [15] P.-Y. Duvivier, V. Mandrillon, J.-P. Polizzi, and K. Inal. Étude de la résistance électrique d'un contact au/au en fonction de la force appliquée. In *19eme Congrès Français de Mécanique*, 2009.
- [16] J. Chang and A. Wang. New vf-power system architecture and evaluation for future aircraft. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 42 :pp. 527–539, 2006.
- [17] Mike Howse. All-electric aircraft. *IEE Power Engineer*, 17 :35–37, 2003.
- [18] A.L. Goleanu, M. Dunand, J.M. Guichon, J.L. Schanen, and J.L. Coulomb. Towards the conception and optimisation of the current return path in a composite aircraft. In *2010 IEEE International Systems Conference*, pages 466–471, 2010.
- [19] G. Gallant and P. Charon. *Current return network element for an aircraft*. Brevet américain, US 20100206986 A1, 2010. [ressource internet], Disponible : <http://www.freepatentsonline.com/20100206986.pdf>, [Consulté : 18 mai 2011].
- [20] A.K. Ray, A. Hibberd, J.R. Travis, and P. Kathirgamanathan. Carbon-filled micro-porous poly(urethane) composites : in-plane conduction and dielectric properties. *Materials Letters*, 28 :475–481, 1996.
- [21] N. Angelidis, N. Khemiri, and PE Irving. Experimental and finite element study of the electrical potential technique for damage detection in cfrp laminates. In *Smart Mater Struct*, volume 14, pages 147–154, 2005.
- [22] T. Prasse, F. Michel, G. Mook, K. Schulte, and W. Bauhofer. A comparative investigation of electrical resistance and acoustic emission during cyclic loading of cfrp laminates. *Compos Sci Technol*, (61) :831–835, 2007.
- [23] K. Schulte and C. Baron. Load and failure analysis of cfrp laminates by means of electrical resistivity measurements. *Compos Sci Technol*, (36) :63–76, 1989.
- [24] L. Shen, J.Li, B.M. Liaw, F. Delate, and J.H. Chung. Modeling and analysis of the electrical resistance measurement of carbon fiber polymer-matrix composites. *Compos Sci Technol*, (67) :2513–2520, 2007.
- [25] D. Wang and D.D.L. Chung. Comparative evaluation of the electrical configurations for the two-dimensional electric potential method of damage monitoring in carbon fiber polymer-matrix composite. *Smart Mater Struct*, (15) :1332–44, 2006.
- [26] M. Wang, K. Qinjun, and P. Ning. Thermal conductivity enhancement of carbon fiber composites. *Applied Thermal Engineering*, vol. 29 :pp. 418–421, 2009.

- [27] W. Janischewskyj and G. Gela. Finite element solution for electric fields of corona-ting dc transmission lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-98(3) :1000–1012, 1979.
- [28] Tadasu Takuma, Tsutomu Ikeda, and Tadashi Kawamoto. Calculation of ion flow fields of hvdc transmission lines by the finite element method. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100(12) :4802–4810, 1981.
- [29] Tadasu Takuma and Tadashi Kawamoto. A very stable calculation method for ion flow field of hvdc transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, PWRD-2(1) :189–198, 1987.
- [30] M. Abdel-Salam, M. Th. El-Mohandes, and H. El-Kishky. Electric field around parallel dc and multi-phase ac transmission lines. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 25(6) :1145–1152, 1990.
- [31] Wei Li, Bo Zhang, Jinliang He, Rong Zeng, and Shuiming Chen. Ion flow field calculation of multi-circuit dc transmission lines. *2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application*, 08 :16–19, 2008.
- [32] D.W. Exner and G.H. Singer Jr. Impedance data for 400-cycle aircraft distribution systems. *Advance Copy Not Released for Publication*, 1952.
- [33] R.J. Mohr. Coupling between open and shielded wire lines over a ground plane. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, EMC-9(2) :34–45, 1967.
- [34] William T. Weeks. Calculation of coefficients of capacitance of multiconductor transmission lines in the presence of a dielectric interface. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, MTT-18(1) :35–43, 1970.
- [35] Clayton R. Paul. Solution of the transmission-line equations for three-conductor lines in homogeneous media. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, EMC-20(1) :216–222, 1978.
- [36] Roger F. Harrington and Cao Wei. Losses on multiconductor transmission lines in multilayered dielectric media. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, MTT-32(7) :705–710, 1984.
- [37] Cao Wei, Roger F. Harrington, Joseph R. Mautz, and Tapan K. Sarkar. Multiconductor transmission lines in multilayered dielectric media. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 32(4) :439–450, 1984.
- [38] Wim Delballe and Daniël De Zutter. Space-domain Green’s function approach to the capacitance calculation of multiconductor lines in multilayered dielectrics with improved surface charge modeling. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 37(10) :1562–1568, 1989.

- [39] Ji Zheng and Zhengfan Li. Accelerating capacitance computation for interconnects in high speed mcm by Padé approximation. *Electronics Letters*, 33(3) :217–218, 1997.
- [40] Ji Zheng and Zhengfan Li. Efficient parameter computation of 2-d multiconductor interconnection lines in layered media by convergence acceleration of dielectric Green’s function via Padé approximation. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 46(9) :1339–1343, 1998.
- [41] Hasan Ymeri, Bart Nauwelaers, and Karen Maex. On the capacitance and conductance calculations of integrated-circuit interconnects with thick conductors. *Microwave and Optical Technology Letters*, 30(5) :335–339, 2001.
- [42] Weiwei Shu and Shanjia Xu. Capacitance extraction for multiconductor transmission lines in multilayered dielectric media using the numerical Green’s function. *Microwave and Optical Technology Letters*, 40(6) :529–531, 2004.
- [43] S. Mylvaganam H. Lorenzen, J. Timmerberg. Calculation of cable parameters for different cable shapes, 2008.
- [44] S. M. Musa and M. N. O. Sadiku. Capacitance computation of multilayered and multiconductor interconnects using finite element method. *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2008 Boston*, 2008.
- [45] Sarhan M. Musa and Matthew N. O. Sadiku. Finite element analysis of multiconductor transmission lines in multilayered dielectric media. *Microwave and Optical Technology Letters*, 50(10) :2743–2747, 2008.
- [46] S. M. Musa and M. N. O. Sadiku. Modeling of open-coupled homogeneous striplines. *Journal of Applied Science & Engineering Technology*, pages 21–28, 2008.
- [47] C. R. Paul. *Introduction to Electromagnetic Compatibility (2nd edition)*. Wiley-Interscience, 2006.
- [48] John Essick. *Hands-On Introduction to LabVIEW for Scientists and Engineers*. Oxford University Press Inc., 2009.
- [49] Matt Nawrocki Rick Bitter, Taqi Mohiuddin. *LabVIEW Advanced Programming Techniques*. Taylor & Francis Group, LLC, 2007.
- [50] Julien Vayrette. Mesures expérimentales. Technical report, École Polytechnique de Montréal, 2010.
- [51] William Tsé. Caractérisation électrique de matériaux en composite pour fuselages d’avion. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, 2010.
- [52] J. Coulombe F. Sirois. Characterization of electrical resistance of hts coated conductors at high currents using ultra-fast regulated current pulses. *Superconductor Science and Technology*, en processus d’impression au moment de consultation, 2010.

- [53] Collaboration for NDT Education. *Conductivity and Resistivity Values for Aluminum & Alloys*. [ressource internet], Consulté : 14 mars 2010. Disponible : http://www.ndted.org/GeneralResources/MaterialProperties/ET/Conductivity_Al.pdf.
- [54] D. J. Griffiths. *Introduction to Electrodynamics (3rd edition)*. Benjamin Cummings, 1998.
- [55] Alan E. Zantout and Olesya I. Zhupanska. On the electrical resistance of carbon fiber polymer matrix composites. *Composites : Part A*, pages 1719–1727, 2010.
- [56] G. Windred. *Electrical Contacts*. London : Macmillan and Co., 1940.
- [57] M. Braunovic, V.V. Konchits, and N.K. Myshkin. *Electrical Contacts : fundamentals, applications and technology*. Boca Raton : CRC Press, 2007.
- [58] R. Holm. *Electric Contacts : theory and applications*. New York : Springer-Verlag, 1967.
- [59] Bombardier. *Bombardier Global 5000 Factsheet*. [ressource internet], Consulté : 14 mars 2010. Disponible : http://www2.bombardier.com/en/3_0/3_2/pdf/global_5000_factsheet.pdf.
- [60] Kenneth R. Demarest. *Engineering Electromagnetics*. Prentice Hall, Inc., 1998.
- [61] *Supplemental Notes Two-Wire and Parallel Plate Transmission Lines*. [ressource internet], Spring 2000. Disponible : <http://hibp.ecse.rpi.edu/~connor/education/Fields/TwoWire-ParallelPlateLines.PDF>.

ANNEXE A

Mesures de résistivité électrique d'une fibre de carbone individuelle

À l'été 2010, des essais ont été réalisés par Julien Vayrette au Laboratoire en énergie électrique de l'École Polytechnique de Montréal. Cette annexe présente les résultats des mesures de résistivité électrique d'une fibre de carbone unique, sans inclusion de résine. Un microscope électronique à balayage a été utilisé pour observer les fibres, tel que montré à la figure A.1 [50].

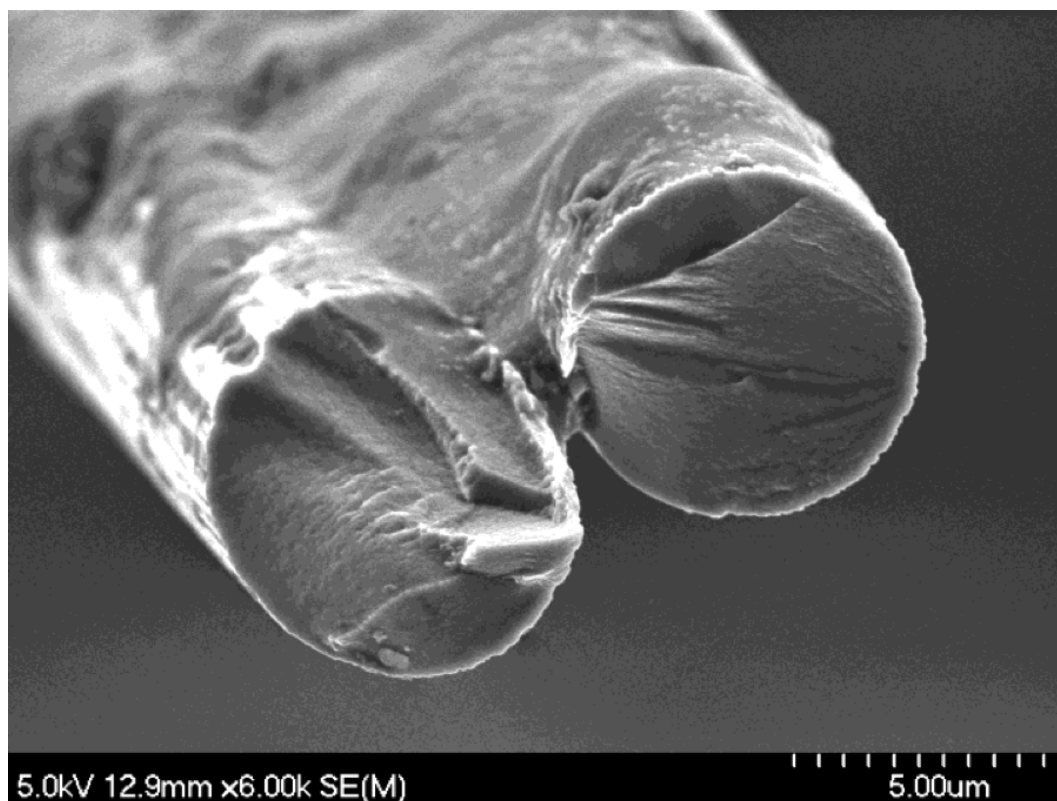


Figure A.1 Deux fibres de carbone observées au microscope à balayage

La résistivité a été mesurée pour 2 fibres juxtaposées, et ensuite calculée pour une seule fibre. Les résultats ont été validés par quelques mesures impliquant un plus grand nombre de fibres. La résistivité mesurée pour une fibre de carbone unique est de $13,69 \mu\Omega m$. Dans la littérature consultée pour le projet actuel [8], ceci est comparable à la résistivité électrique des fibres de carbone *HM Type I* et *HS Type II*, qui sont respectivement de $9 - 10 \mu\Omega m$ et $15 - 18 \mu\Omega m$.

ANNEXE B

Détails techniques des échantillons de composite de carbone

Les figures B.1 et B.2 montrent les détails de fabrication du composite de carbone utilisé dans le cadre de ce projet. Les fibres de carbone de chaque couche sont retenues par de la résine et orientées selon la direction spécifiée à la figure B.2, suivant la nomenclature *C20*, *C30* etc. On peut également remarquer le nom *M10* relatif au maillage de cuivre et le nom *A120* relatif à l'adhésif permettant la fixation de la structure de renfort en nid d'abeille (*ITEM33*).

Par laminé, on entend l'ensemble des couches de chaque côté de la structure en nid d'abeille, excluant cette structure de renfort. Ainsi, cette construction comprend 2 couches de laminé ainsi qu'une structure de renfort centrale en polyamide.

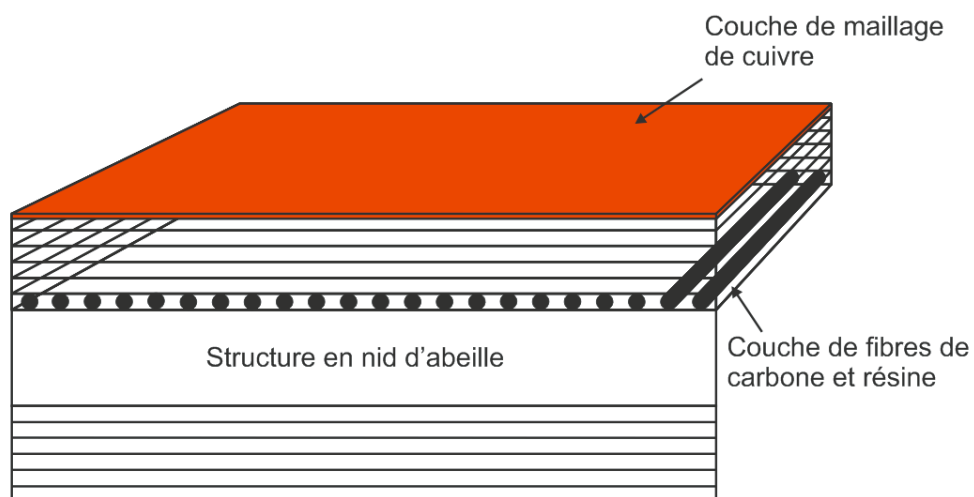


Figure B.1 Coupe de profil d'un échantillon de composite de carbone

PLY LAYUP TABLE													
EX1325300001-001													
NW#	SEQ - STEP	ORIENTATION									MATERIAL	NOTE	
		-017	-019	-021	-023	-025	-027	-029	-031				
M10	A10										BAMS 553-001 CL2, TY2, GR4		
C20	A20	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°			45°	
C30	A30	-	0°	0°	-	0°	0°	0°	0°			0°	
C40	A40	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°			-45°	
C50	A50	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°			90°	
C60	A60	-	-	-45°	-	-	-45°	-	-			-	
C70	A70	-	-	45°	-	-	45°	-	-			-	
C80	A80	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°			90°	
C90	A90	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°			-45°	
C100	A100	-	0°	0°	-	0°	0°	0°	0°			0°	
C110	A110	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°			45°	
A120	A120	X	X	X	X	X	X	X	X		FILM ADHESIVE, BAMS 551-009 GR3		
ITEM 33	A125	X	X	X	-	-	-	-	-		HONEYCOMB		
ITEM 35	A125	-	-	-	X	X	X	-	-		HONEYCOMB		
ITEM 37	A125	-	-	-	-	-	-	X	-		HONEYCOMB		
ITEM 39	A125	-	-	-	-	-	-	-	X		HONEYCOMB		
A130	A130	X	X	X	X	X	X	X	X		FILM ADHESIVE, BAMS 551-009 GR3		
C140	A140	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°			45°	
C150	A150	-	0°	0°	-	0°	0°	0°	0°			0°	
C160	A160	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°			-45°	
C170	A170	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°			90°	
C180	A180	-	-	-45°	-	-	-45°	-	-			-	
C190	A190	-	-	45°	-	-	45°	-	-			-	
C200	A200	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°			90°	
C210	A210	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°			-45°	
C220	A220		0°	0°		0°	0°	0°	0°			0°	
C230	A230	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°			45°	

Figure B.2 Détails techniques des échantillons de composite de carbone

ANNEXE C

Durée d'impulsion optimale pour essais de résistivité

Cette annexe présente les résultats d'essais réalisés dans le but de déterminer la durée de l'impulsion à appliquer à une résistance de valeur arbitraire tout en permettant une lecture correcte d'une chute de tension par le nanovoltmètre Keithley 2182A. La résistance utilisée est de $0,44\ \Omega$ dans laquelle une impulsion de 1 A est appliquée. Ainsi, on devrait lire environ 450 mV. Le programme Pulse_Multimeter_GPIB.vi de la figure C.1 a été utilisé, et les résultats sont montrés dans le tableau C.1.

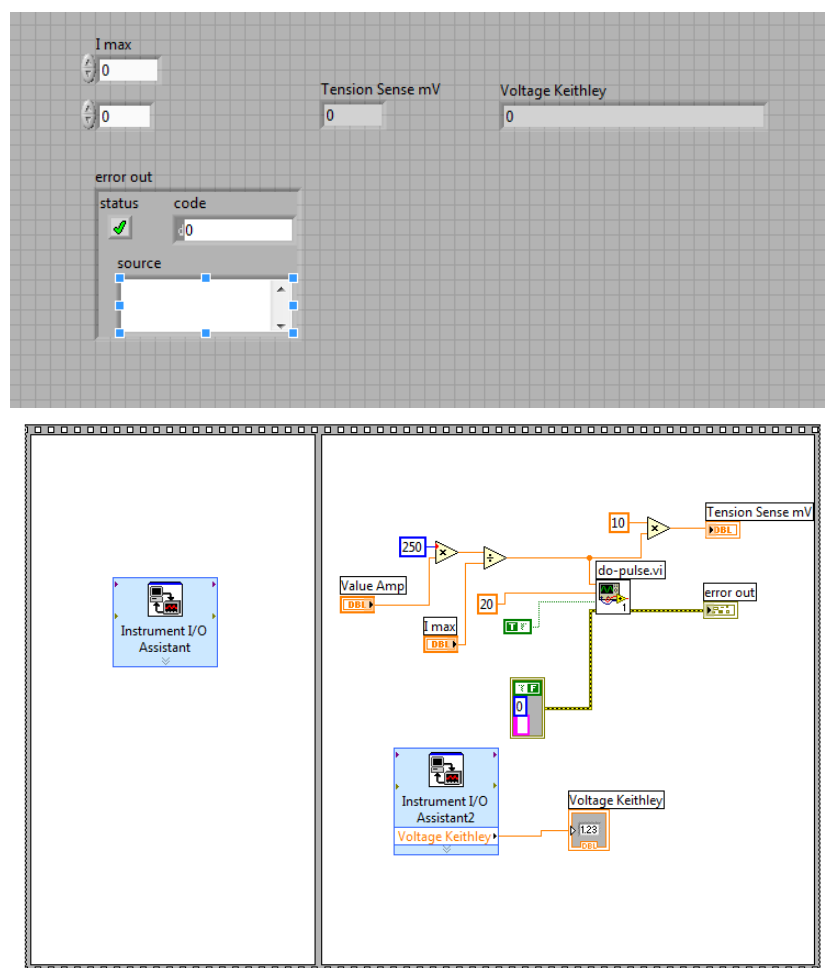


Figure C.1 Interface et diagramme LabVIEW de Pulse_Multimeter_GPIB.vi

On choisit une impulsion avec PLC 1 de 50 ms. Le nombre de cycles, ou taux d'intégration

Tableau C.1 Mesures obtenues avec le nanovoltmètre Keithley 2182A sous excitation impulsionnelle

Cycles d'intégration (PLC) Keithley	Durée de l'impulsion (ms)	Chutes de tension mesurées (mV), 3 mesures en rafale		
5	500	467,905	467,842	467,819
	400	467,763	467,751	467,745
	300	467,737	467,732	467,727
	200	467,725	467,721	467,720
	175	454,731	453,292	454,342
	150	383,585	384,242	384,096
	100	245,796	245,314	244,426
1	500	467,711	467,716	467,707
	400	467,707	467,707	467,700
	300	467,704	467,705	467,703
	200	467,708	467,707	467,703
	100	467,709	467,713	467,715
	50	467,714	467,718	467,721
	40	391,862	384,698	388,437
0,1	500	467,728	467,740	467,733
	400	467,723	467,706	467,723
	300	467,711	467,700	467,706
	200	467,716	467,712	467,728
	100	467,711	467,728	467,734
	50	467,739	467,761	467,727
	40	467,728	467,750	467,745
	30	467,744	467,766	467,738
	20	364,181	234,425	234,422
	500	467,750	467,833	467,756
	400	467,921	467,939	467,655
	300	467,391	467,741	467,913
	200	467,841	467,836	467,835
	100	467,924	467,758	467,649
0,01	50	467,824	467,830	467,661
	40	467,667	467,933	467,841
	30	467,844	467,934	467,824
	20	467,648	467,931	467,737
	15	234,560	234,551	467,925

PLC représente en quelque sorte le temps requis pour la conversion analogue-digitale réalisée par l'appareil de mesure. Ainsi, un taux d'intégration élevé permet des mesures plus précises,

avec une plus grande résolution numérique au détriment d'un temps de mesure plus élevé. On cherche donc à garder un taux d'intégration PLC relativement élevé afin de rencontrer un bon compromis entre la précision, la résolution et le temps de mesure.

Le module `do-pulse.vi` ainsi que les autres modules intégrés ont été conçus par Jonathan Coulombe, anciennement assistant de recherche au Laboratoire en énergie électrique de l'École Polytechnique de Montréal.

ANNEXE D

Interface LabVIEW pour les mesures de résistivité

L'interface développée pour ces essais permet la mesure et la saisie automatique des données de température et de chute de tension. Dans la partie des ajustements préliminaires, l'utilisateur spécifie les paramètres d'impulsion désirés et les canaux de mesure des cartes de balayage. Une fonction permet également la mesure d'une température de contrôle pour le procédé. Ainsi, à partir d'un canal de température spécifié par l'utilisateur, la température est mesurée et la plage de tolérance spécifiée autour de cette valeur fournit une condition pour le processus. La température de l'échantillon doit revenir à l'intérieur de cette plage pour que la prochaine impulsion soit envoyée. Ceci permet de minimiser les erreurs dues à l'échauffement de l'échantillon soumis aux impulsions électriques. Cette fonction, sous l'onglet lecture, permet également l'affichage de chacun des canaux de température avant les essais. La partie inférieure permet simplement l'affichage des mesures et quelques indicateurs indiquent l'état du processus.

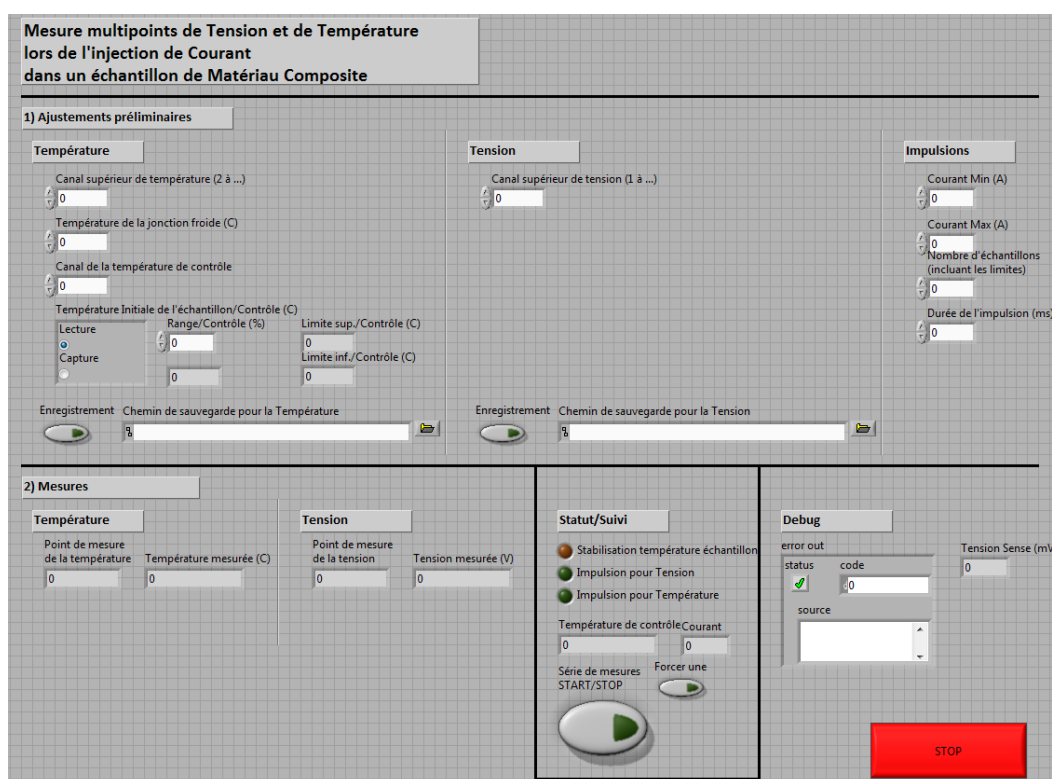


Figure D.1 Interface LabVIEW de Multipoint_Pulse_Final.vi

ANNEXE E

Code Impédances MATLAB-COMSOL

Pour le calcul des paramètres d'impédance par la méthode des éléments finis, le code est divisé de la façon suivante.

- Sim_3_Impedances.m (script principal)
- Sim_3_Impedances_Solver.m (calcul de R et L)
- Sim_3_Impedances_Solver_C2.m (calcul de C)
- Sim_3_Impedances_Cscript.m (algorithme alternatif pour le calcul de C)¹
- Sim_3_Impedances_Solver_C (calcul alternatif de C)²

```
% File: Sim_3_Impedances.m
% This program computes the impedance matrices for a given problem
% Par: David Lalonde
clear all;
clc;

% -----User defined data-----
%***Geometry (boundary domain excluded) start at g2***
% g2=ellip2(0.0025,0.0025,'base','center','pos',[-0.0035,0]);
% g3=ellip2(0.0025,0.0025,'base','center','pos',[-0.006,0.006]);
% g4=rect2(0.02,0.0005,'base','corner','pos',[-0.01,-0.004]);

g2=ellip2(0.0025,0.0025,'base','center','pos',[-0.0035,0]);
g3=ellip2(0.0025,0.0025,'base','center','pos',[0.0035,0]);

USERgeometry = {g2,g3};
USERname = {'Cable1','Cable2'};
USERtags = {'g2','g3'};

%***Constants (boundary domain included as the first values)***
```

1. Code présenté à l'annexe F

2. Code présenté à l'annexe F

```

Conductivity = {0, 5.998e7, 5.998e7};
Permittivity = {1, 1, 1};
Permeability = {1, 1, 1};

%***Frequencies***
freq = 400;           %Fixed
freqLOW = 300;        %These 3 values for frequency scanning
freqHI = 500;
freqSTEP = 100;
% -----

% Number of conductors automatic computing
Nb_cond = size(USERgeometry,2);

% User interface for solving options
disp(' Choose one of the following solving options for the impedance:')
disp(' 1) Solving for a given frequency')
disp(' 2) Solving for a range of frequencies (as function of freq.)')
Choice = input(' Your Choice (1/2): ');
clc;

% R and L Iterations for one frequency
if (Choice==1)
    % Solving the problem one time for each conductor
    Z=zeros(Nb_cond,Nb_cond);
    for i=1:Nb_cond
        I=zeros(Nb_cond);
        I(i)=1;

        %***The given problem to solve***
        Sim_3_Impedances_Solver;

        % Global variables recovery
        for j=1:Nb_cond
            MSG1 = strcat('real(I',num2str(j),')');
            MSG2 = strcat('imag(I',num2str(j),')');

```

```

MSG3 = strcat('real(V',num2str(j),')');
MSG4 = strcat('imag(V',num2str(j),')');

% Currents
Ir=postglobalplot(fem,{MSG1},'outtype','postdataonly');
Ir=Ir.p(2,1);
Ii=postglobalplot(fem,{MSG2},'outtype','postdataonly');
Ii=Ii.p(2,1);
I_R(j) = Ir+1j*Ii;

% Voltages
Vr=postglobalplot(fem,{MSG3},'outtype','postdataonly');
Vr=Vr.p(2,1);
Vi=postglobalplot(fem,{MSG4},'outtype','postdataonly');
Vi=Vi.p(2,1);
V_R(j) = Vr+1j*Vi;

% Impedances (since I(i) = 1)
Z(j,i) = V_R(j);
end
end
% Print results
R = real(Z)
L = imag(Z)/(2*pi*freq)

% R and L Iterations for a frequency range
else
    Index = 1;
    for freq=freqLOW:freqSTEP:freqHI
        % Solving the problem one time for each conductor
        Z=zeros(Nb_cond,Nb_cond);
        for i=1:Nb_cond
            I=zeros(Nb_cond);
            I(i)=1;

            %***The given problem to solve***

```

```

Sim_3_Impedances_Solver;

% Global variables recovery
for j=1:Nb_cond
    MSG1 = strcat('real(I',num2str(j),')');
    MSG2 = strcat('imag(I',num2str(j),')');
    MSG3 = strcat('real(V',num2str(j),')');
    MSG4 = strcat('imag(V',num2str(j),')');

    % Currents
    Ir=postglobalplot(fem,{MSG1},'outtype','postdataonly');
    Ir=Ir.p(2,1);
    Ii=postglobalplot(fem,{MSG2},'outtype','postdataonly');
    Ii=Ii.p(2,1);
    I_R(j) = Ir+1j*Ii;

    % Voltages
    Vr=postglobalplot(fem,{MSG3},'outtype','postdataonly');
    Vr=Vr.p(2,1);
    Vi=postglobalplot(fem,{MSG4},'outtype','postdataonly');
    Vi=Vi.p(2,1);
    V_R(j) = Vr+1j*Vi;

    % Impedances (since I(i) = 1)
    Z(j,i) = V_R(j);
end
end

% Print results
R{1,Index} = freq;
R{2,Index} = real(Z);
L{1,Index} = freq;
L{2,Index} = imag(Z)/(2*pi*freq);
Index = Index + 1;
end

%***R and L Postprocessing scripting***

```

```

Choice = 0;
while (Choice ~= 1)
    disp(' Quit(1) or Plot options(2): ')
    Choice = input(' Your Choice (1/2): ');
    if (Choice == 2)
        disp(' Specify R and L indices (x,y): ')
        x = input(' x = ');
        y = input(' y = ');
        clc;
        for i=1:Index-1
            Fplot(1,i) = R{1,i};
            Rplot(1,i) = R{2,i}(x,y);
            Lplot(1,i) = L{2,i}(x,y);
        end
        figure(1)
        plot(Fplot,Rplot)
        title(['R(',num2str(x),',',',num2str(y),')(f)']);
        xlabel('Frequency(Hz)');
        ylabel(['R(',num2str(x),',',',num2str(y),')']);
        figure(2)
        plot(Fplot,Lplot)
        title(['L(',num2str(x),',',',num2str(y),')(f)']);
        xlabel('Frequency(Hz)');
        ylabel(['L(',num2str(x),',',',num2str(y),')']);
    end
end
clc;
end

%% Computing the values of C
for Domain=2:Nb_cond
    Sim_3_Impedances_Solver_C2;
end;

```

```

% File: Sim_3_Impedances_Solver.m
% COMSOL Multiphysics Model M-file
% Generated by COMSOL 3.5a (COMSOL 3.5.0.603, $Date: 2008/12/03 17:02:19$)
% Modifié par: David Lalonde
flclear fem

% COMSOL version
clear vrsn
vrsn.name = 'COMSOL 3.5';
vrsn.ext = 'a';
vrsn.major = 0;
vrsn.build = 603;
vrsn.rcs = '$Name: $';
vrsn.date = '$Date: 2008/12/03 17:02:19 $';
fem.version = vrsn;

% Geometry
% Exterior domain
g1=rect2(0.25,0.25,'base','corner','pos',[-0.125,-0.125]);

% Analyzed geometry
clear s
s.objs={g1};
s.name={'domaine'};
s.tags={'g1'};

fem.draw=struct('s',s);

% Insertion of USER geometry
fem=geomanalyze(fem);
fem.draw.s.objs(2:Nb_cond+1) = USERgeometry;
fem.draw.s.name(2:Nb_cond+1) = USERname;
fem.draw.s.tags(2:Nb_cond+1) = USERtags;
[fem, map]=geomanalyze(fem);

```



```

figure(1);
geomplot(fem,'sublabels','on');
title('Numbering of the subdomains');

% Constants
for k=1:Nb_cond
    fem.const{1,2*k-1} = strcat('I',num2str(k),'0');
    fem.const{1,2*k} = I(k);
end

% Initialize mesh
fem.mesh=meshinit(fem,'hauto',5);

% Mesh refinement (if needed)
fem.mesh=meshrefine(fem,'mcase',0,'rmethod','regular');

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'PerpendicularCurrents';
appl.module = 'ACDC';
appl.sshape = 2;
appl.assignsuffix = '_emqa';
clear prop
prop.analysis='harmonic';
appl.prop = prop;
clear equ
equ.sigma = Conductivity;
equ.epsilonr = Permittivity;
equ.mur = Permeability;
for k=1:Nb_cond
    DeltaV{1,k} = strcat('V',num2str(k));
end
equ.deltaV = [{0},DeltaV];
for k=1:Nb_cond+1
    equ.ind(1,k) = k;
end

```

```

appl.equ = equ;
appl.var = {'nu',freq};
fem.appl{1} = appl;
fem.frame = {'ref'};
fem.border = 1;
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;

% Coupling variable elements
clear elemcpl
% Integration coupling variables
clear elem
elem.elem = 'elcplscalar';
elem.g = {'1'};
src = cell(1,1);
clear equ
for k=1:Nb_cond
    for l=1:Nb_cond+1
        if (l==k+1)
            equ.expr{1,k}{1,l} = 'Jz_emqa';
            equ.ipoints{1,k}{1,l} = '4';
            equ.frame{1,k}{1,l} = 'ref';
        else
            equ.expr{1,k}{1,l} = {};
            equ.ipoints{1,k}{1,l} = {};
            equ.frame{1,k}{1,l} = {};
        end
    end
end
for k=1:Nb_cond+1
    equ.ind{1,k} = {num2str(k)};
end
src{1} = {}, {}, equ;
elem.src = src;
geomdim = cell(1,1);

```

```

geomdim{1} = {};
elem.geomdim = geomdim;
for k=1:Nb_cond
    elem.var{1,k} = strcat('I',num2str(k));
    elem.global{1,k} = num2str(k);
end
elemcpl{1} = elem;
fem.elemcpl = elemcpl;

% ODE Settings
clear ode
ode.dim = DeltaV;
for k=1:Nb_cond
    ode.f{1,k} = strcat('I',num2str(k),'-I',num2str(k),'0');
    ode.init{1,k} = '0';
    ode.dinit{1,k} = '0';
end
clear units;
units.basesystem = 'SI';
ode.units = units;
fem.ode=ode;

% Multiphysics
fem=multiphysics(fem);

% Extend mesh
fem.xmesh=meshextend(fem);

% Solve problem
fem.sol=femstatic(fem,'solcomp',[DeltaV',{'Az'}],'outcomp',[DeltaV',{'Az'}],
'blocksize','auto');

-----
-----

% File: Sim_3_Impedances_Solver_C2.m

```

```

% COMSOL Multiphysics Model M-file
% Generated by COMSOL 3.5a (COMSOL 3.5.0.603, $Date: 2008/12/03 17:02:19$)
% Modifié par: David Lalonde
flclear fem

% COMSOL version
clear vrsn
vrsn.name = 'COMSOL 3.5';
vrsn.ext = 'a';
vrsn.major = 0;
vrsn.build = 603;
vrsn.rcs = '$Name: $';
vrsn.date = '$Date: 2008/12/03 17:02:19 $';
fem.version = vrsn;

% Geometry
% Exterior domain
g1=rect2(0.25,0.25,'base','corner','pos',[-0.125,-0.125]);

% Analyzed geometry
clear s
s.objs={g1};
s.name={'domaine'};
s.tags={'g1'};

fem.draw=struct('s',s);

% Insertion of USER geometry
fem=geomanalyze(fem);
fem.draw.s.objs(2:Nb_cond+1) = USERgeometry;
fem.draw.s.name(2:Nb_cond+1) = USERNAME;
fem.draw.s.tags(2:Nb_cond+1) = USERtags;
[fem, map]=geomanalyze(fem);

% Initialize mesh
fem.mesh=meshinit(fem,'hauto',5);

```

```

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'EmElectrostatics';
appl.module = 'ACDC';
appl.shape = {'shlag(2,'V')','shlag(2,'lm1')'};
appl.gporder = {4,30};
appl.border = 'on';
appl.assignsuffix = '_emes';
clear prop
clear weakconstr
weakconstr.value = 'on';
weakconstr.dim = {'lm1'};
prop.weakconstr = weakconstr;
appl.prop = prop;
clear bnd
%bnd.inport = {0,1};
for i=1:size(fem.draw.s.objs,2)
    bnd.inport{1,i} = 0;
end

%bnd.wcshape = 2;
%bnd.type = {'V0','port'};
%bnd.wcgporder = 2;
%bnd.portnr

% Imposing voltages on conductors
bnd.ind = bound(fem.geom,1,1,zeros(1,flgeomnbs(fem.geom)));
for j=2:size(fem.draw.s.objs,2)
    bnd.ind = bound(fem.geom,j,1,bnd.ind);
end;
bnd.ind = bound(fem.geom,Domain,2,bnd.ind);

appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.shape = 1;

```

```

equ.ind = ones(1,size(fem.draw.s.objs,2));      %equ.ind = [1,1];
appl.equ = equ;
fem.appl{1} = appl;
fem.frame = {'ref'};
fem.border = 1;
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;

% ODE Settings
clear ode
clear units;
units.basesystem = 'SI';
ode.units = units;
fem.ode=ode;

% Multiphysics
fem=multiphysics(fem);

% Extend mesh
fem.xmesh=mesextend(fem);

% Solve problem
fem.sol=femstatic(fem,'solcomp',{'lm1','V'},'outcomp',{'V','lm1'},
'blocksize','auto');

% Integrate
I1=postint(fem,'C11_emes','unit','F','recover','off','dl',1,'edim',0);

```

ANNEXE F

Code MATLAB-COMSOL pour calcul alternatif de C

```

% File: Sim_3_Impedances_Cscript.m
% This script is the algorithm for the new and alternative method using a
% linear system.
% Par: David Lalonde
%% Building the upper part of the linear system's matrix A
if (Nb_cond == 2)
    A = 1;
    Nb_inc = 1;
else
    A = [1 1 0; 1 0 1; 0 1 1];
    Nb_inc = 3;
    if (Nb_cond > 3)
        for i=4:Nb_cond
            Nb_inc = 0;
            for j=1:i-1
                Nb_inc = Nb_inc + j;
            end;
            Nb_supp = Nb_inc - i;
            B = zeros(1,Nb_inc);
            C = zeros(i-1,i-1);
            for j=1:i-1
                B(1,j) = 1;
                C(j,j) = 1;
            end;
            A = [B; C A];
        end;
        Indice = Nb_cond + 1;
    end;
end;
end;

```

```

%% Voltage combinaison matrix
Voltages = zeros(2,Nb_inc);
if (Nb_cond == 2)
    Voltages(1,1) = 1;
else
    for i=1:Nb_cond
        Voltages(1,i) = i;
    end;
end;

%% Building the lower part of the linear system's matrix A
if (Nb_cond > 3)
    for i=1:Nb_cond-1
        for j=i+1:Nb_cond
            if (Indice <= Nb_inc)
                A(Indice,:) = xor(A(i,:),A(j,:));
                Voltages(1,Indice) = i;
                Voltages(2,Indice) = j;
                Indice = Indice + 1;
            end;
        end;
    end;
end;

%% Voltage imposition and solving
for i=1:Nb_inc
    Iteration = i;
    Sim_3_Impedances_Solver_C;
    for j=1:Nb_cond+1
        All_domains(1,j) = j;
    end;
    B(i,1) = postint(fem,'We_emes','unit','N','recover','off','dl',
        All_domains);
end;

%% Solving Linear system

```



```

C = inv(A)*2*B;

-----

-----

% File: Sim_3_Impedances_Solver_C.m
% COMSOL Multiphysics Model M-file
% Generated by COMSOL 3.5a (COMSOL 3.5.0.603, $Date: 2008/12/03 17:02:19$)
% Modifié par: David Lalonde
flclear fem

% COMSOL version
clear vrsn
vrsn.name = 'COMSOL 3.5';
vrsn.ext = 'a';
vrsn.major = 0;
vrsn.build = 603;
vrsn.rcs = '$Name: $';
vrsn.date = '$Date: 2008/12/03 17:02:19 $';
fem.version = vrsn;

% Geometry
% Exterior domain
g1=rect2(0.25,0.25,'base','corner','pos',[-0.125,-0.125]);

% Analyzed geometry
clear s
s.objs={g1};
s.name={'domaine'};
s.tags={'g1'};

fem.draw=struct('s',s);

% Insertion of USER geometry
fem=geomanalyze(fem);
fem.draw.s.objs(2:Nb_cond+1) = USERgeometry;

```

```

fem.draw.s.name(2:Nb_cond+1) = USERNAME;
fem.draw.s.tags(2:Nb_cond+1) = USERTags;
[fem, map]=geomanalyze(fem);

% Initialize mesh
fem.mesh=meshinit(fem,'hauto',5);

% Mesh refinement (if needed)
fem.mesh=meshrefine(fem,'mcase',0,'rmethod','regular');

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'EmElectrostatics';
appl.module = 'ACDC';
appl.border = 'on';
appl.assignsuffix = '_emes';
clear bnd
bnd.V0 = {0,0,1};
bnd.type = {'V0','cont','V'};

% Imposing voltages on conductors
bnd.ind = bound(fem.geom,1,1,zeros(1,flgeomnbs(fem.geom)));
for j=2:size(fem.draw.s.objs,2)
    bnd.ind = bound(fem.geom,j,2,bnd.ind);
end;
bnd.ind = bound(fem.geom,Voltages(1,Iteration)+1,3,bnd.ind);
if (Voltages(2,Iteration) ~= 0)
    bnd.ind = bound(fem.geom,Voltages(2,Iteration)+1,3,bnd.ind);
end;

appl.bnd = bnd;
fem.appl{1} = appl;
fem.frame = {'ref'};
fem.border = 1;
clear units;
units.basesystem = 'SI';

```

```
fem.units = units;

% ODE Settings
clear ode
clear units;
units.basesystem = 'SI';
ode.units = units;
fem.ode=ode;

% Multiphysics
fem=multiphysics(fem);

% Extend mesh
fem.xmesh=mesextend(fem);

% Solve problem
fem.sol=femstatic(fem,'solcomp',{'V'},'outcomp',{'V'},'blocksize','auto');
```